



# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL: MOTOR TÈRMIC BERDROD**

**AUTORS: BERNET DUQUE, MARC-TEODOR**

**DATA DE PRESENTACIÓ: JULIOL, 2019**

**COGNOMS:           BERNET DUQUE**

**NOM: MARC**

**TITULACIÓ: GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA**

**PLA:**

**DIRECTOR:**

**DEPARTAMENT:**

**QUALIFICACIÓ DEL TFG**

**TRIBUNAL**

**PRESIDENT**

**SECRETARI**

**VOCAL**

**DATA DE LECTURA:**

**Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals:   ☐ Sí   ☐ No**

## RESUM

Estudi de la viabilitat d'una variant del motor de combustió interna alternatiu de quatre temps destinat a vehicles, principalment motocicletes, que combina la adequació metamòrfica de la funcionalitat dels elements que el formen depenent de les condicions externes i internes.

Tot i que el nombre de cilindres pot variar, el prototip d'estudi és un motor tetracilíndric que mitjançant la sobrealimentació dels propis cilindres tal i com fa un compressor d'èmbols alternatiu en una primera zona de treball aconseguix un major aprofitament del parell per a una cilindrada reduïda ideal per conduccions de vehicles en ciutat de baix consum amb demanda baixa de potencia però amb una resposta de gas amb major tacte sense temps de retràs de sobrealimentació; és a partir d'un cert rang de velocitat angular del motor que tots els 4 cilindres disponibles entren a formar part d'un motor atmosfèric comú amb la característica sensació d'elasticitat que atorga la potencia repartint el parell en un ampla zona de revolucions.

D'aquesta manera podem obtenir el parell directe a baixes revolucions característic de motors mono o bicilíndrics, amb l'estirada dels motors tetracilíndrics o de major nombre de cilindres, fet que el converteix en una màquina bastant polivalent.

El prototip és basa en un motor actual d'una motocicleta per a poder contrastar valors. A més d'aquesta manera és simplifica el disseny teòric doncs és pot conservar el bloc motor amb el mecanisme biela-manovella (pistons, biela i cigonyal) de sèrie i produir una culata nova on veurem la dificultat que comprèn quadrar una distribució amb els temps que requereix per al nostre model.

Es contempla de la manera més pròxima a la realitat l'estudi de la fase tancada discretitzat per a cada grau girat del cigonyal amb les diferents fases dels cilindres del motor per a extreure una corba potencia acurada. La fase tancada comprèn la compressió la combustió i l'expansió. La renovació de la càrrega, l'admissió i l'escapament, també es contemplen però de manera diferent.

Els resultats són satisfactoris, amb un desenvolupament de prestacions predit.

S'ha triat la culata com a peça clau mitjançant disseny assistit per ordinador per a generar un arxiu 3D i fer plànols per a una possible fabricació.

Amb el disseny 3D podem veure la viabilitat mecànica per a veure que el sistema de distribució és l'encertat.

**Paraules clau (màxim 10):**

MICA	MCIA	Motocicleta	Polivalent
Metamòrfic	Sobrealimentació	Culata	Distribució
Vehicle	Motor		

**ABSTRACT**

This is a research for an alternative four strokes internal combustion engine mounted on all type of vehicles but mainly designed for mid-high powerful motorbikes. The prototype of the engine is capable of transforming itself depending on the internal conditions or the external surrounding factors.

Even though the numbers of cylinders can increase or decrease with no mattering the research is based on a 4-cylinder engine actually mounted on a real bike in order to compare the results of both models.

The main idea at a low range of RPM's is to use a partial number of its cylinders to supercharge the rest of chambers as well as a compressor do, pumping pressured air into the engine cylinder to improve the volumetric performance, having a good torque at low RPM's within a low consumption and a good response from the throttle without lagging problems, ideal for urban riding, this is the looping phase. Then, when the engine is speeding up and the rider needs that elongation of the throttle given by the power, all the cylinders became combustion chambers to offer that elastic torque in a wide range of revolutions ideal for high-speed roads.

With this method the engine can imitate the strong torque behaviour of a mono or bi-cylinder machine and at the same time reproduce the characteristic power of a four or more cylinder engine.

The prototype is based on a real model due to this is an easier way to design it because only modifying the piston-head block and focusing on the timing system we have reached the goals we have proposed.

The research has been done the most equal to reality working on every single degree spined of the crankshaft studying the closed phase which contemplates the compression, the combustion, and the expansion and all the heat-transfer to the walls; the intake and the exhaust are also direct involved but in a different way. The results were successful as well as we predicted.

Throughout a three-dimensional modelling program we have designed the piston-head which it has allowed us to know all the components were working right without physical interferences of the mechanism. It also let us the

opportunity to transfer every component in a 2D sheet in case the prototype were made.

**Keywords (10 maximum):**

Engine	Combustion	Transformation	Timing
Vehicle	Motorbike	Supercharged	Dual
Compressor	Alternative		

## SUMARI

1. Introducció	9
2. Estat de l'art	10
2.1. Història general dels motors tèrmics més exitosos o comuns.	10
2.1.1. Inicis de la propulsió mitjançant la combustió interna.	10
2.1.1.1. Rivaz.	10
2.1.1.2. Barsanti-Matteucci.	11
2.1.1.3. Lenoir	11
2.1.1.4. Otto	12
2.1.2. Primeres evolucions	13
2.1.2.1. Motor de dos temps Clerk	13
2.1.2.2. Introducció del Motor MEC Dièsel	13
2.1.2.3. Motor rotatiu de tres temps Wankel	14
2.1.3. Adaptació per a vehicles	15
2.1.3.1. Primera Motocicleta	15
2.1.3.2. Primer vehicle de tres rodes	15
2.1.3.3. Primer automòbil	15
2.2. Sistemes de sobrealimentació.	16
2.2.1. Classificació dels sistemes de sobrealimentació més emprats	16
2.2.1.1. Alimentació d'encarament dinàmic	18
2.2.1.2. Compresors mecànics	18
2.2.1.2.1. Roots o lòbuls	19
2.2.1.2.2. Lysholm o Twin screw	20
2.2.1.2.3. Compresor G	20
2.2.1.3. Compresors Dinàmics	21
2.2.1.3.1. Turbo carregador	21
2.2.1.3.2. Turbocompressor	21
2.2.1.4. Compresors híbrids	23
2.2.1.4.1. Compres	23
2.2.2. Diagrama comparatiu entre els diferents compresors volumètrics mecànics	24
2.2.3. Comportament de diferents sistemes de sobrealimentació sobre un MCIA	25
2.2.4. Alternatives no comuns de sobrealimentació. Sistema escollit.	26
2.3. Funcionament d'un MCIA de cicle Otto	27
2.3.1. Cicle termodinàmic teòric Otto	28
3. Motor de combustió interna Berdrod	29
3.1. Previsions de comportament i eficiència	30
3.2. Potencial en motors tetracilíndrics	30
3.3. Ordres i seqüències de la distribució	32
3.4. Sistema de distribució a la pràctica	33
3.4.1. Freevalve timing sistem	33
3.4.2. Solució mecànic-hidràulica per a la distribució	34
3.4.2.1. Base VTEC	34
3.4.2.2. Base VVT (Variable valve timing)	35

3.4.2.3. Base cicle Budack Volkswagen	36
3.4.3. Tria del sistema de distribució	37
3.5. Models Posteriors Beta	38
3.5.1. Combinació de conceptes d'altres models de motor	39
3.5.1.1. Motor Atkinson/Miller	40
3.5.1.2. Motor Ilmor	40
3.5.1.3. Motor Scuderi	40
3.5.1.4. Propostes i idees compartides	41
4. Estudi de la capacitat del cicle i modelització numèrica del del motor	42
4.1. Hipòtesis i definicions prèvies	42
4.1.1. Referent al fluid motor	42
4.1.2. Consideracions varies	43
4.2. Cinemàtica del mecanisme	43
4.2.1. Paràmetres fonamentals	44
4.3. Termodinàmica del sistema	44
4.3.1. Paràmetres fonamentals	45
4.3.2. Equilibri químic de la reacció mescla combustible-comburent	45
4.3.3. Calors específics $C_p$ i $C_v$	45
4.3.4. Constant adiabàtica i politròpica	46
4.4. Compensió politròpica	47
4.5. Combustió	49
4.6. Expansió politròpica	51
4.7. Tancament del diagrama P-V del cicle	51
5. Dades, resultats i diagrames obtinguts	52
5.1. Comparació de potències i parells entre els dos models	52
5.2. Comparació model Berdrod en la seva totalitat i el motor de sèrie	55
5.3. Motor Berdrod corba potència parell en vers el règim de gir del motor	57
5.3.1. Solucions per a suavitzar el canvi de fase	57
6. Condicions d'us i funcions lògiques	60
7. Combustibles més adequats per al model Berdrod.	60
7.1. Característiques ideals	60
7.2. Hidrogen	61
7.3. Etanol	61
7.4. Metanol	62
7.5. Gas natural (GNC i GNL)	63
7.6. Gasos líquuats del petroli (GLP)	64
7.7. Elecció final	65
8. Picat o knock	65
8.1. Càlcul de previsió de detonació	67
9. Materials, recobriments, tractaments, i fabricació	68
9.1. Culata (bloc)	68
9.2. Arbre de lleves	69
9.3. Vàlvula	70
9.4. Guies de vàlvula	71
9.5. Molles	72

9.6. Tapa de balancins	73
9.7. Altres elements de la culata	73
9.8. Taula de materials	74
9.8.1. Masses	76
9.8.2. Materials metàl·lics emprats	76
10. Pressupostos.	77
10.1. Pressupost de l'estudi i disseny del prototip.	77
10.2. Pressupost del producte físic.	77
10.3. Producció en sèrie.	77
10.3.1. Suma total dels pressupostos	77
10.3.2. Balanç	77
11. Impacte mediambiental	78
12. Conclusió del projecte	78
13. Agraïments	79
14. Bibliografia, webgrafia.	79
14.1. Bibliografia consultada	79
14.2. Webgrafia consultada	80
15. Modelització numèrica, càlculs amb Microsoft Excel©.	(Annex I)
16. Plànols.	(Annex II)



## SUMARI DE FIGURES

II·lustració 1	Automòbil de Rivaz	10
II·lustració 2	Motor Lenoir	11
II·lustració 3	Anunci publicitari del motor Otto.	12
II·lustració 4	Motor Clerk 2T	13
II·lustració 5	Motor de Rudolf Dièsel	13
II·lustració 6	Cicles motor Wankel	14
II·lustració 7	Motor rotatiu Wankel destapat, i Fèlix Wankel	14
II·lustració 8	Primera motocicleta amb MCIA de Wilhelm Maybach	15
II·lustració 9	primer vehicle propulsat per MCIA de tres rodes	15
II·lustració 10	primer automòbil de quatre rodes propulsat per MCIA	15
II·lustració 11	Classificació de sobrealimentadors segons l'accionament.	17
II·lustració 11	Tipus de compressor segons mètode emprat per a l'accionament	17
II·lustració 12	Implementació d'ajuda per encarament dinàmic de l'aire.	18
II·lustració 13	Compressor de lòbuls sense tapa	19
II·lustració 14	Evolució del pas de l'aire per un compressor de lòbuls	19
II·lustració 15	Translació del fluid d'un compressor Lysholm	20
II·lustració 16	Compressor G	20
II·lustració 17	Desplaçament de l'aire a través d'un compressor G	20
II·lustració 18	Imatge d'un compressor centrífug tipus turbocarregador	21
II·lustració 19	Funcionament esquematitzat turbocompressor	22
II·lustració 20	Esquema del seguiment del flux dels gasos en un sistema complex	23
II·lustració 21	Diagrama de l'eficiència adiabàtica d'alguns compressors	24
II·lustració 22	Diagrama de parell-revolucions d'un motor amb diferents sistemes de sobrealimentació	25
II·lustració 23	Taula comparativa compressors volumètrics i turbocompressors	26
II·lustració 24	Cicle de quatre temps motor otto	28
II·lustració 25	Diagrama termodinàmic teòric del cicle d'Otto	28
II·lustració 26	Culata seccionada amb vàlvules comandades electrònicament	33
II·lustració 27	Actuació de les fases d'activació del VTEC	34
II·lustració 28	Rodet hidràulic seccionat	35
II·lustració 29	Pins retràctils	36
II·lustració 30	Motor Berdrod. Dibuix de la vista superior de la culata destapada	37
II·lustració 31	Sistema de biela composta Atkinson	40
II·lustració 32	Motor Ilmore	40

Il·lustració 33 Motor Scuderi	40
Il·lustració 34 Longituds participants en el mecanisme biela-manovella	44
Il·lustració 35 Diagrama Pressió-volum i l'efecte de la constant politròpica	46
Il·lustració 36 Valors del sensors IAT i IAP de la motocicleta Suzuki gsr 600	47
Il·lustració 37 Evolució d'una autoignició no dessitjada .	65
Il·lustració 38 Diagrama que mostra el dosatge relatiu en vers la temperatura	67
Il·lustració 39 Bolc culata	68
Il·lustració 40 Taula de designacions d'aliatges d'alumini	69
Il·lustració 41 Arbres de lleves	69
Il·lustració 42 Imatge de diferents models de vàlvula de seient	70
Il·lustració 43 Imatge de diferents tipus de guies	71
Il·lustració 44 Molla triple de competició	72
Il·lustració 45 Imatge d'una tapa de balancins	73
Il·lustració 46 Empenyedors/taqués hidràulics	73
Il·lustració 47 Retenidors	73
Il·lustració 48 Cargols de culata	73

## **1. INTRODUCCIÓ**

El meu nom es Marc Teodor Bernet Duque i tinc el plaer d'haver de dur a terme aquest treball de final de grau d'enginyeria mecànica dirigit sota la tutoria de Joan Josep Aliau Pons i presentar-lo a la universitat Politècnica de Catalunya ja que el projecte es basa en una idea que des de temps ha, volia desenvolupar per a satisfer la necessitat de realització personal.

Aquest treball pretén ser una base documentada d'un nou projecte anomenat MOTOR BERDROD del qual parteix del convencional model de motor de quatre temps anomenat també motor de cicle Otto amb la diferent particularitat de donar un ús polivalent als cilindres de la màquina tèrmica per a augmentar el rendiment d'aquesta mateixa.

Com a projecte nou que parteix de zero em concerneix el fet de poder entrebancar-me i és de ben segur que sorgiran problemes com a disseny nou això hi va inclòs. Es tractarà doncs, d'aplicar el coneixement adquirit per tal de superar dits contratemps amb la màxima eficàcia escollint la més òptima solució.

El desenvolupament del producte és total, no obstant el disseny serà parcial per poder tractar-lo com ha treball de final de grau, ja que estem davant d'un projecte molt llarg i complex amb especialització múltiple.

Espero que els problemes que puguin sorgir no siguin suficients com per clausurar tot el projecte, merament modificar-lo en tot cas.No voldria que la meva motivació acabi sent esclava de la presumpció, però tinc fe en el projecte, tot i que no tinc altes expectatives de que sigui un producte genuí, crec que té prou força.

Dic això perquè des de bon principi m'agradaria deixar ben clar que el que promou aquest projecte no és l'ambició de generar una idea de producció que generi béns posteriorment, sinó la curiositat de veure la eficiència i el desenvolupament d'aquest nou motor i l'auto-plaer de inventar-lo. Tot i aquesta última pinzellada egoista, un cop vists tots aquests paràmetres es plantejaria la zona de mercat on prendria un valor òptim.

Queda clar doncs que l'economia de venta en massa queda en segon pla, pendent d'un estudi de mercat, i l'economia d'inversió directe queda protegida amb fets com l'estalvi d'energia en processos de fabricació, ús de material just i necessari, elecció de els mecanismes més simples, etc.

Se que es podria malentendre la meua visió del projecte com personal i no social, i se que com a futur enginyer ambdós afers haurien de ser el propòsit inicial però segons el meu parer una comporta a l'èxit de l'altre, i queda esmentat així que es un treball d'un prototip i de complaure la pròpia curiositat. Espero de ben grat estimat lector que pugueu conviure amb aquest pensament.

En el treball es parla sobretot d'automoció i motociclisme per que és un tema força quotidià per al públic, més que l'aplicació industrial generadora d'energia o l'aeronàutica. Un cop tinguem una visió prou extensa de l'evolució podrem encara el projecte cap al nostre model i un cop finalitzat veure quina és la millor aplicació possible.

## **2. ESTAT DE L'ART**

### **2.1 Història general dels motors de combustió més exitosos o comuns.**

Com a alumne sempre disposat a aprendre i futur successor em complau reconèixer les obres del passat que han construït les bases del nostre dia a dia en el món de l'enginyeria. És per això que mosdtró un breu recull de la feina que ens ha deixat la història i que gràcies a ella podem començar des d'un punt de partida més elevat.

#### **2.1.1 Inicis de la propulsió mitjançant la combustió interna.**

La història del motor de combustió interna o "a explosió" comença després de la invenció de la màquina a vapor que funcionava mitjançant la generació de combustió externa. Com a punt a favor envers al vapor, el motor de benzina obtenia el seu funcionament mitjançant la combustió interna que es dona per la barreja d'aire amb el combustible. No queda clar qui va ser el creador del motor de combustió interna, o si fou més d'un integrant, per això exposarem totes les fonts conegudes i contrastades.

##### **2.1.1.1 Rivaz**

A principis del segle XIX, l'enginyer franc-suís Francois Isaac de Rivaz ja havia dissenyat, com altres tants, diversos automòbils impulsats per vapor d'aigua. Però l'esperit innovador de Rivaz no es donava per satisfet, i va començar a desenvolupar un motor de combustió interna, en contraposició a la combustió externa pròpia de les màquines mogudes de vapor d'aigua.

El 30 de gener de 1807 se li atorgava a Paris la patent núm 731 pel seu invent, que emprava la força d'explosions controlades de substàncies combustibles ( mescla d'hidrogen i oxigen emmagatzemades en una espècie de globus ), en comptes de vapor d'aigua, per impulsar diferents màquines. Era tan lent, aparatós i sorollós que l'Acadèmia de Ciències de França es va atrevir a profetitzar que el motor de combustió interna mai podria competir amb el conegut i provat motor a vapor.

Rivaz no es va acovardir davant les crítiques, i va decidir construir un vehicle complet al voltant del seu nou nascut motor. El 1813 va presentar el seu projecte, al que va anomenar La Gran Cadira Mecànica: un monstre de sis metres de llarg, rodes de gairebé dos metres d'alt i un pes que rondava la tona. Amb cada explosió del motor (que tenia un cilindre de 1.5 metres de carrera) el vehicle aconseguia avançar una distància equivalent a la seva longitud a una velocitat de 3 km / h.

La seva millor performance va consistir en obtenir una sèrie de 25 ignicions consecutives (provocades d'una en una manualment), suficients perquè el cotxe es pogués desplaçar una distància poc més gran que la longitud d'un



**II-Il·lustració 49 Automòbil de Rivaz**

<http://liberauto.blogspot.com/2007/06/i-saac-de-rivaz-1807.html>

camp de futbol. A dia d'avui pot semblar una fita insignificant, ja que hagués estat més còmode i ràpid recórrer aquesta distància a peu, però l'objectiu estava complert: Rivaz mostrava al món el primer vehicle automòbil impulsat per un motor de combustió interna.

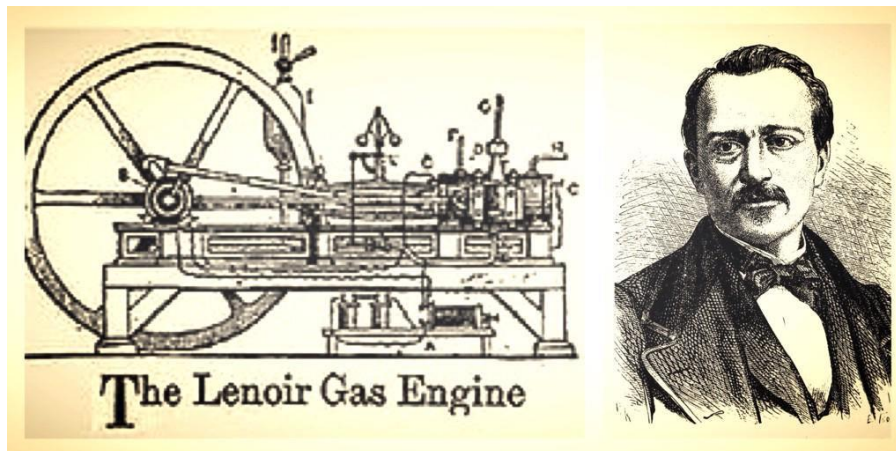
### **2.1.1.2 Barsanti-Matteucci**

Segons altres fonts la invenció es pot remuntar a dos italians: el pare Eugenio Barsanti, un sacerdot escolapi, i Felice Matteucci, enginyer hidràulic i mecànic, que ja al 1853 van detallar documents d'operació i construcció i patents pendents a diversos països europeus com Gran Bretanya, França, Itàlia i Alemanya.

Els primers prototips d'aquest episcopal i enginyer no tenien la fase de compressió completa; és a dir, la fase de succió acabava prematurament amb el tancament de la vàlvula d'admissió abans que el pistó arribés a la meitat, el que provocava que l'espurna que generava la combustió que empeny la carrera del pistó fos feble. Com a conseqüència el funcionament d'aquests primers motors era deficient.

### **2.1.1.3 Lenoir**

Oficialment, el primer motor de combustió interna auto-sustentat(a diferència de la inginió de la guspira manual del motor del Sr.Rivaz) va ser construït el 1860 per un enginyer belga anomenat Etienne Lenoir, aquest propulsor consumia gas d'enllumenat però amb prou feines podia utilitzar només un 3% de l'energia que es produïa.



Il·lustració 50 Motor Lenoir

<https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjD4PCZjdLXAhVLthoKHeCNAsIQjRwIBw&url=https%3A%2F%2Ftwitter.com%2Fkeyshistoria%2Fstatus%2F554628767319347201&psig=AOvVaw2-UXTa2OGUtNyY>

Oficialment, el primer motor de combustió interna auto-sustentat(a diferència de la inginió de la guspira manual del motor del Sr.Rivaz) va ser construït el 1860 per un enginyer belga anomenat Etienne Lenoir, aquest propulsor consumia gas d'enllumenat però amb prou feines podia utilitzar només un 3% de l'energia que es produïa.

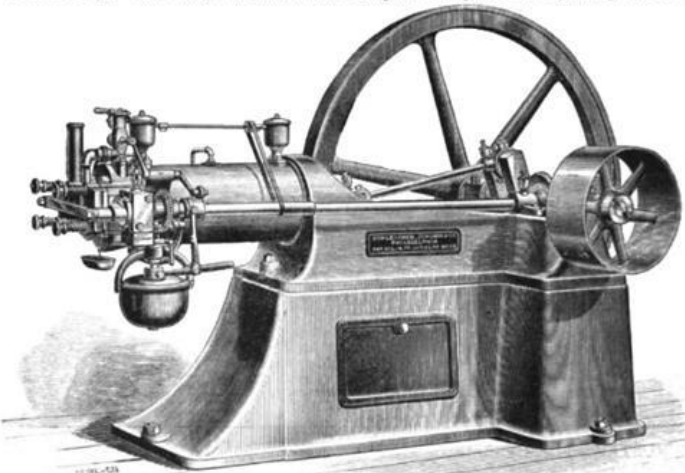
#### 2.1.1.4 Otto

Una dècada i mitja després hi hauria una petita evolució desenvolupada per l'alemany Nikolaus Otto, que el 1876 va implementar el funcionament amb el cicle de quatre temps. Otto havia creat una màquina que s'encenia per espurna externa i accionament per pistons alternatius, però a causa de la seva gran mida no podia utilitzar-se en automòbils. No obstant això, el nom d'aquest motor va ser patentat amb el cognom del seu fundador, Otto, encara que tothom el coneix com a motor de gasolina o explosió.

**"OTTO" GAS ENGINE.**  
**LARGELY USED FOR ELECTRIC LIGHTING.**

NO BOILER NEEDED. OVER 10,000 WORKING.

*25 to 100 per cent. more Power than other Engines using the same quantity of Gas.*



The only Gas Engine which received a Gold Medal at the Paris Electrical Exhibition, 1881.

SIZES:—1, 2, 4, 7, 10, 15 and 25 INDICATED HORSE-POWER.

The "OTTO" GAS ENGINE is the first really successful Gas Engine ever produced. Since the beginning of its manufacture by Mr. Otto's licensees, here and in Europe, over 10,000 Engines have been made and sold. A few unsuccessful or partially successful imitations have of course, been attempted in consequence, but our sales, notwithstanding, have steadily increased, whilst would-be rivals have been able to do little or nothing.

We guarantee our Engines to burn 25 to 100 per cent. less Gas than others, and to be superior in general reliability, efficiency and convenience.

**SCHLEICHER, SCHUMM & Co.,**  
N.E. COR. 33rd, and WALNUT STS., PHILADELPHIA, PA., U.S.A.

New York Agency:—  
47, DEY STREET.

Chicago Branch:—  
214, RANDOLPH STREET.

Il·lustració 51 Anunci publicitari del motor Otto.

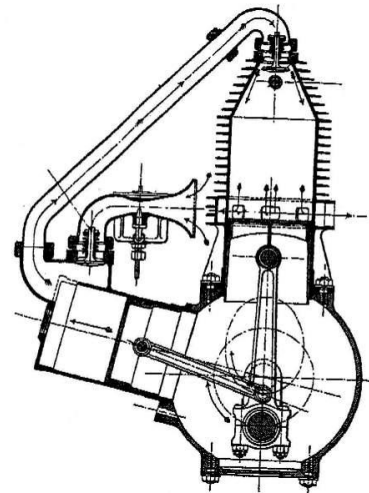
<https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=&url=http%3A%2F%2Fvintagemachinery.org%2Fmfgindex%2Fimagedetail.aspx%3Fid%3D15310&psig=AOvVaw2-UXTa2OGUtNyYMTdi6MVS&ust=1511436478535285>



## **2.1.2 Primeres evolucions**

### **2.1.2.1 Motor dos temps Clerk**

Tot just dos anys després apareix una nova evolució, aquest cop amb un cicle de dos temps, va ser realitzada per l'escocès Dugald Clerk qui va aconseguir fer el primer motor satisfactori en 1878. El motor de Clerk funciona amb escombrada forçada per bomba de cilindre de manera semblant als grans motors de combustió per compressió dièsel de dos temps de l'actualitat per expulsar els gasos cremats, però respecte a aquests, més actuals, amb un cilindre específic i únicament per a l'alimentació.

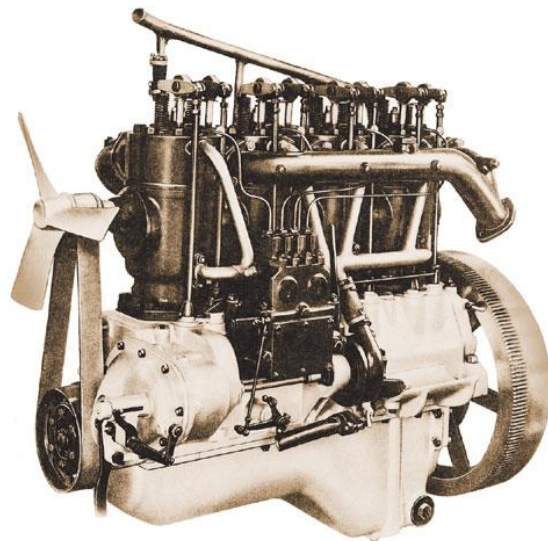


II-lustració 52 CLERK 2T MOTOR,

[https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewiB4JankdLXAhUM5BoKHT3nDxwQjRwlBw&url=http%3A%2F%2Fwww.aumet.fi%2Fhtml%2Fclerks\\_engine.htm&psig=AOvVaw1Yb\\_K1f7L2h0vTsfzNVouU7&ust=1511438477736634](https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewiB4JankdLXAhUM5BoKHT3nDxwQjRwlBw&url=http%3A%2F%2Fwww.aumet.fi%2Fhtml%2Fclerks_engine.htm&psig=AOvVaw1Yb_K1f7L2h0vTsfzNVouU7&ust=1511438477736634)

### **2.1.2.2 Introducció del motor MEC Dièsel**

També hi va haver una altra variant de motorització, aquest cop introduïda en 1892 per un altre alemany, Rudolf Dièsel que va inventar un propulsor d'autoignició que funcionava amb combustibles pesats, sent el que avui coneixem com a motor dièsel. A diferència del motor a gasolina, el dièsel era més gran i lent, al mateix temps que donada la seva complexa construcció comportava alts costos de producció. Els primers motors dièsel senzills eren incòmodes pel seu elevat nivell acústic i no tenien un bon comportament en accelerar com sí ho feien els de variant de gasolina. Va ser recentment en 1923 que un motor dièsel, d'aquestes característiques ja millorades, es va introduir en un camió.



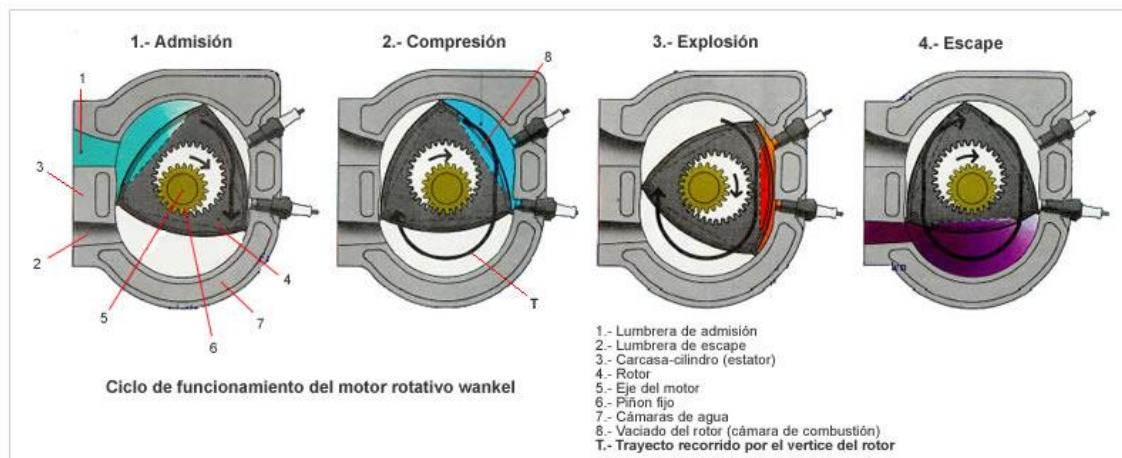
II-lustració 53 Motor de Rudolf Dièsel

[http://4.bp.blogspot.com/-SoVp2lt3JPo/UMixq5\\_r1wI/AAAAAAAAApY/u3vibmzRzPU/s1600/Diesel+Engine.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-SoVp2lt3JPo/UMixq5_r1wI/AAAAAAAAApY/u3vibmzRzPU/s1600/Diesel+Engine.jpg)

### 2.1.2.3 Motor rotatiu de tres temps Wankel

A mitjans del segle XX al 1957 l'alemany Felix Wankel va fabricar el primer motor rotatiu de tres temps.

El motor Wankel du a terme els mateixos cicles que un motor Otto, però l'un darrere l'altre en una sola rotació de l'eix motriu. Durant un gir del rotor, es duen a terme tres admissió, tres compressió, tres explosions i tres escapaments. Per fer-ho, el motor du un rotor, que gira excèntricament dins una superfície interior en forma de cambra ovalada. Els vèrtexs del rotor duen unes barres prismàtiques que fan pressió sobre la concavitat de la cambra i asseguren l'estanquitat d'un cantó del rotor a l'altre.



II-lustració 54 Observem en aquesta imatge els cicles mencionats en vista seccionada del motor Wankel. <http://www.aficionadosalamecanica.net/imagesartic/wankel-funcion.jpg>



II-lustració 55 Motor rotatiu Wankel destapat, i Fèlix Wankel.  
[https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ah\\_UKEwiKm5uQydLXAhXIPxoKHQeAAR4QjRwlBw&url=https%3A%2F%2Fjalopnik.com%2Fthe-inventor-of-the-rotary-engine-was-a-nazi-nutjo](https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ah_UKEwiKm5uQydLXAhXIPxoKHQeAAR4QjRwlBw&url=https%3A%2F%2Fjalopnik.com%2Fthe-inventor-of-the-rotary-engine-was-a-nazi-nutjo)



### **2.1.3 Adaptació per a vehicles**

#### **2.1.3.1 Primera motocicleta**

Fins aquí parlem del motor en si mateix, però a partir de quan va ser incorporat en un automòbil?

Va caldre esperar uns anys més, perquè en 1885 Daimler muntés el motor de gasolina d'alta velocitat, que fos desenvolupada per un altre enginyer alemany, Wilhelm Maybach però sobre una motocicleta, començant la història de la moto.



**Il·lustració 56** Primera motocicleta de motor de combustió intern documentada de Wilhelm Maybach i Gottlieb Daimler <https://revistamoto.com/wp-content/uploads/2016/03/daimler-reitwagen-large-31301.jpg>

#### **2.1.3.2 Primer vehicle de tres rodes**

A l'any següent, el 1886 Karl Benz, va aconseguir la patent alemanya 37435 del que es considera el primer automòbil, encara que bastant diferent de com avui els coneixem. Aquest primer vehicle era de tres rodes, és a dir un tricicle, amb xassís tubular impulsat per un motor monocilíndric, situat en posició horitzontal, de 954 cm<sup>3</sup> i una potència declarada de 2/3 CV a 250 rpm.



**Il·lustració 57** primer vehicle propulsat per motor de combustió interna de tres rodes.  
<https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwjE2tbkdxLXAhVMXR0KHVVhAXoQjRwIBw&url=https%3A%2F%2Fwww.daimler.com%2Fcompany%2Ftradition%2Fcompany-history%2F1885->

#### **2.1.3.3 Primer automòbil**

Pocs mesos després, novament Gottlieb Daimler tornaria a escriure la història, aquest cop en construir el primer automòbil propulsat però de quatre rodes i dues velocitats de transmissió. El xassís i la carrosseria es tractava d'un carruatge descapotat de cavalls amb motor d'un sol pistó acoblat en posició central vertical. No és fins al 1889 que l'associació Daimler-Maybach aconseguís comercialitzar el primer automòbil propulsat per un motor de dos cilindres en V que incorporava una caixa del canvi de quatre marxes.



**Il·lustració 58** primer automòbil de quatre rodes propulsat per motor de combustió interna.  
[https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiWqc-ektLXAhWE1RoKHfTGCmWQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.mercedes-benz-nc.com%2F1886-1900.0001.0002.html&psig=AOvVaw1BufNqNEY3tqKsqYI\\_e\\_rk&ust=1511438737629376](https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiWqc-ektLXAhWE1RoKHfTGCmWQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.mercedes-benz-nc.com%2F1886-1900.0001.0002.html&psig=AOvVaw1BufNqNEY3tqKsqYI_e_rk&ust=1511438737629376)

## **2.2 SISTEMES DE SOBREALIMENTACIÓ**

La sobrealimentació, també conegut com a inducció forçada és un sistema que s'utilitza perquè un motor de combustió interna desenvolupi més potència i parell per la següent lògica: Com més mescla d'aire i combustible pugui encabir en el cilindre major l'energia produïda.

Un motor sobrealimentat utilitza un compressor per augmentar la massa d'aire i conseqüentment la quantitat de oxigen comburent que entra al cilindre en la fase d'admissió, augmentant la seva pressió en el motor, podent així introduir més combustible, per augmentar la força de la carrera de treball, és a dir el parell motor en cada revolució així doncs també en cada instant de temps i per punt la potència també es veu incrementada. L'avantatge és que s'aconsegueix obtenir l'energia equivalent d'un cilindre de major tamany amb un volum més reduït i econòmic, a part, en alguns tipus de sobrealimentació s'aprofita l'energia d'explosió que no s'ha pogut aprofitar en el cicle.

Els motors amb major compressió assoleixen rendiments mes propers al disseny teòric de la maquina motriu per que s'aproxima més al model adiabàtic. Evidentment és necessària l'extracció de calor ja que els materials no resistirien l'elevada temperatura.

Tot i sobrealimentar motors des de temps immemorials, la indústria on major evolució i implantació va tenir l'alimentació forçada va ser l'aeronàutica. Els motors de pistons que utilitzaven els avions perdien rendiment a mesura que augmentaven l'altura a la que volaven en baixar la pressió i densitat de l'aire, de manera que per compensar, es va optar per muntar compressors mecànics i turbocompressors a aquells motors.

D'aquí a passar als motors de l'automoció com a manera d'extreure més potència dels motors existents, no hi va haver res més que un pas.

### **2.2.1 Classificació dels sistemes de sobrealimentació més emprats**

La complexitat i efectivitat ha anat en augment en aquests anys, parlarem dels més importants en profunditat.

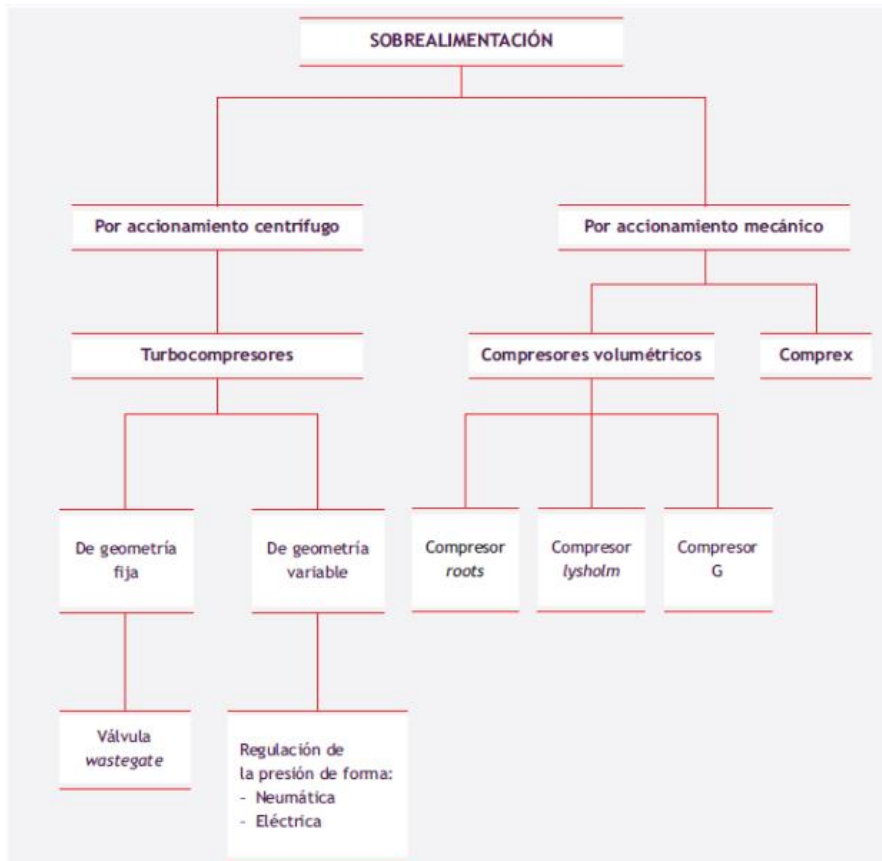
Els compressors són les maquines per aconseguir aquesta sobrealimentació i es poden classificar segons l'accionament d'aquests (accionament mecànic, a reacció o un híbrid) o bé segons la manera que el fluid es desplaça i rep l'energia per aconseguir la sobrepressió:

**COMPRESSORS VOLUMÈTRICS O DEDESPLAÇAMENT POSITIU:** En aquests compressors existeix una massa ben definida de fluid gasós delimitada per la geometria del compressor, la qual evoluciona segons els processos que se li apliquen dins de la màquina.

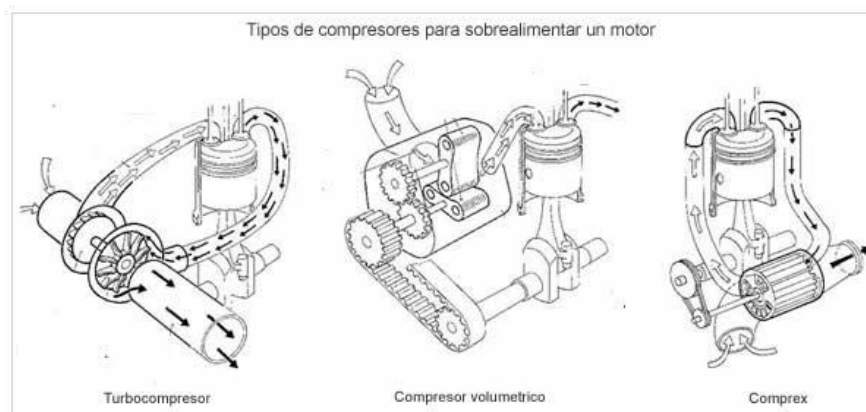
**COMPRESSORS DINÀMICS O TURBOCOMPRESSORS:** En aquests compressors la massa de fluid gasós no està definida i el fluid circula contínuament a través de la màquina. La màquina disposa d'un "rodet" d'un determinat diàmetre que gira a una

determinada velocitat de rotació i li comunica energia cinètica al fluid, la qual per un procés de difusió de la corrent fluida es transforma en energia de pressió en l'interior de la màquina.

En general, els compressors dinàmics treballen a cabals elevats i acostumen a ser molt compactes, mentre que els compressors volumètrics ho fan a cabals més baixos. En el que respecta a la relació de compressió, els compressors volumètrics són aptes per proporcionar elevats valors de compressió, mentre que els compressors dinàmics treballen a valors molt més baixos.



Il·lustració 59 tipus de sobrealimentadors classificats segons l'accionament.  
<file:///C:/Users/Marc/Downloads/SOBREALIMENTACION%20EN%20MOTORES.pdf>



Il·lustració 60 tipus de compressor segons el mètode emprat per a l'accionament, dos grans blocs, dinamicotèrmics, mecànics, i l'hibrid entre aquests dos, per ordre d'esquerra a dreta.  
<http://www.aficionadosalamecanica.net/turbo.htm>

### **2.2.1.1 Alimentació D'encarament dinàmic**

No considerada del tot com a sistema de sobrealimentació, però si d'ajuda a l'inducció del fluid.

Aquesta ajuda de l'entrada de l'aire utilitza les propietats dinàmiques dels gasos per mitjà d'ones de xoc, inèrcies dels gasos i ressonadors per introduir més comburent dins el motor. La seva efectivitat no és molt alta, però alguns cotxes utilitzen admissió d'aire variables que s'aprofiten d'aquestes propietats per millorar lleugerament la capacitat d'introduir aire en els seus cilindres. Entre d'altres sistemes d'aquest tipus destaquen aquells que orienten la seva admissió en direcció de la marxa, fent que una major quantitat d'aire entri en l'admissió i augmentant, molt lleugerament, la potència del motor. Aquest sistema es va utilitzar en diversos cotxes dels seixanta, però actualment no s'utilitza, en part per la dificultat d'instal·lació i la influència en l'aerodinàmica que tindria una boca oberta en direcció de la marxa.



**Il·lustració 61** La peça cromada en la part superior d'aquest motor és una implementació d'ajuda dinàmica de l'aire, és molt comú trobar-ne juntament amb carregadors mecànics de cargol en cotxes americans tipus muscle. <https://i.ytimg.com/vi/Vg-FcRnsbj4/maxresdefault.jp>

### **2.2.1.2 Compressors mecànics**

Els compressors mecànics van ser la primera manera de sobrealimentar els motors tèrmics. Allà per 1885 Gottlieb Daimler va adaptar una bomba d'aire de tipus Roots o lòbuls que s'utilitzava en els forns metal·lúrgics al motor d'un dels seus vehicles, era el primer compressor mecànic per sobrealimentar motors del món. Des de llavors i fins al dia d'avui, la història de la sobrealimentació ha anat fluïnt al mateix temps que els motors de combustió interna.

Els compressors mecànics són aquells que utilitzen un sistema de tracció mecànica, normalment una corretja, engranatges o una cadena, per operar un sistema bombejant aire a l'interior dels cilindres. Els veiem a continuació:

- **2.2.1.2.1 Roots o lòbuls:**

**Compressor de desplaçament positiu.**

**Poc cabdal i pressió moderada .**

**Ideal en condicions de baix regim de gir.**

**Rendiment general:  $\eta=40\%$**

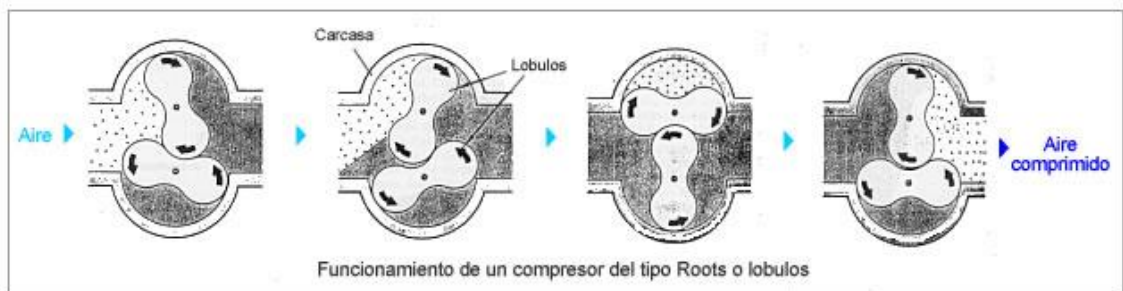


II-lustració 62 Compressor de lòbuls sense tapa. <https://4.imimg.com/data4/VC/HA/MY-25416/high-pressure-blowers-250x250.jpg>

Uns rotors que engranen perfectament a mesura que giren, deixen uns espais formats contra la carcassa on van muntats on es formen unes bosses d'aire, que a mesura que els rotors giren avancen cap a la sortida del compressor. Existeix però una petita part d'aire que per l'atracció del engranatje i de la tolerància que preguen aquest tipus de bomba retorna a l'entrada.

La pressió que subministri serà més gran que l'atmosfèrica si el compressor és capaç d'aportar un cabdal d'aire superior al que el motor pot evacuar.

Amb una disposició helicoidal dels lòbuls s'aconsegueix un subministrament més uniforme, reduint així els efectes pulsatoris de l'aire.



II-lustració 63 Evolució del pas de l'aire per un compressor de lòbuls o roots en vista seccionada. <http://www.aficionadosalamecanica.net/imagesturbo/compresor-roots-func.jpg>

### [APUNT CIENTÍFIC]

Cal recordar que a mesura que els processos mecànics augmenten en velocitat l'aire incrementa de viscositat i les fuites minoren, un exemple clar es la formula emprada en fluids viscosos on es busca el fregament com l'oli en un amortidor en sistemes de suspensió on veiem que a major velocitat major força per obligar al fluid a passar per les cavitats resistents. L'exemple més clar d'aquest fenomen és el de donar un parell de cops amb el palmell obert a l'aigua en una piscina o algun lloc habilitat primer amb poca velocitat i després amb molta velocitat, notarem l'enduriment del fluid en aquesta segona prova, el principi és el mateix.

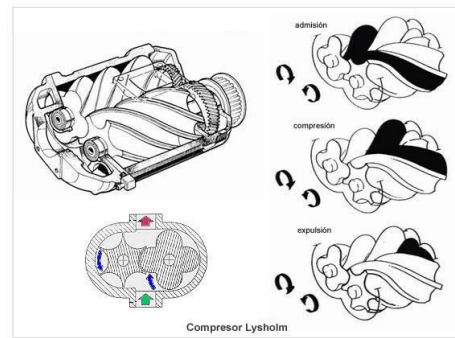
$$F_{fregament}[N] = B_{coeficient\ de\ viscositat}[N \cdot s/m] \cdot V_{velocitat}[\frac{m}{s}]$$



- **2.2.1.2.2 Lysholm o twin screw:**

**Compressor volumètric.**  
**Poc cabdal i alta pressió.**  
**Ideal en règims de gir baixos.**  
**Rendiment general:  $\eta=80\%$**

Composat per dos rodets allargats helicoidals que giren engranats en paral·lel fan que l'aire entri i es desplaci longitudinalment on el fluid es va comprimint a mesura que transcorre ja que aquest rodets que ens recorden a dos cargols d'unió són lleugerament cònics. Més eficient que el compressor Roots ja que el moviment de les peces mecàniques es positiu i no retorna cap a l'entrada el fluid.



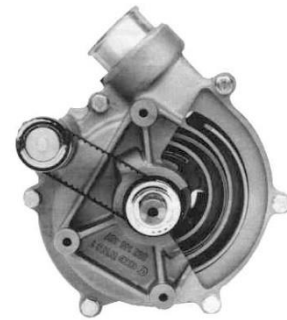
**Il·lustració 64** Translació del fluid (en negre) en un compressor lysholm.  
[http://www.aficionadosalamecanica.net/imagesturbo/sprintex\\_compresor.jpg](http://www.aficionadosalamecanica.net/imagesturbo/sprintex_compresor.jpg)

- **2.2.1.2.3 Compressor G:**

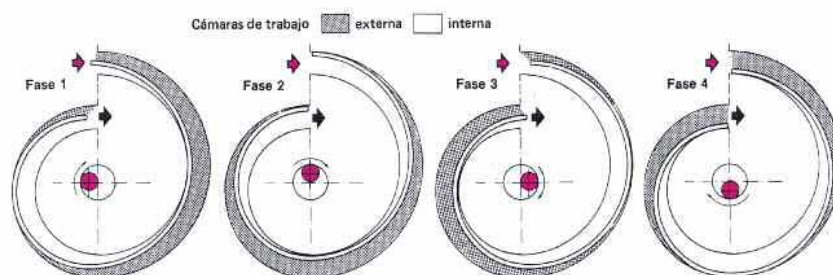
**Compressor volumètric.**  
**Rendiment general:  $\eta= 60\%$**

Hi ha un circuit fix en la carcassa i un circuit mòbil, tots dos en forma d'espiral, sent el mòbil el que arrossega la politja del compressor on aquest té un moviment oscil·lant, com una rotació descentrada, que empeny l'aire cap a la paret de l'espiral fixa i el va desplaçant a través d'aquest laberint.

Aquests compressors són més silenciosos i compactes que els anteriors, la seva estructura genera un reduït efecte pulsatori de les ones del aire que puguin generar sò.



**Il·lustració 65** Compressor G amb mossegada, es pot observar el rodet interior i la carcassa en forma espiral.  
<https://talleractual.com/tecnica/partes-de-motor/1318-sobrealimentacion-los-compresores-dinamicos-y-volumetricos>



**Il·lustració 66** Desplaçament de l'aire a través d'un compressor G fases simplifiades en vista seccionada. <https://talleractual.com/tecnica/partes-de-motor/1318-sobrealimentacion-los-compresores-dinamicos-y-volumetricos>

### **2.2.1.3 Compressors dinàmics:**

- **2.2.1.3.1 Turbocarregador:**

**Compressor centrífug, dinàmic, d'accionament mecànic.**

**Cabdal mitjà alt i pressió mitja.**

**Resposta rapida d'ompliment d'aire a l'admissió.**

Seguint un ordre de règim de treball en augment aquest es el element auxiliar d'accionament mecànic en sobrealimentació de motors que proporciona més cabdal en un rang molt ampli de revolucions (r.p.m mitges/altes per a un motor convencional) però amb menys pressió.

El rotor de la turbina d'un compressor centrífug ha de girar a molt alta velocitat per a moure una quantitat d'aire suficient, per al que es recorre a un grup multiplicador d'engranatges que transforma les revolucions que arriben a l'eix impulsor en un major nombre que permetin al rotor girar a una velocitat propera a l'òptima.



**Il·lustració 67** Imatge d'un compressor centrífug tipus turbocarregador amb mossegada que mostra els elements interiors. Es poden diferenciar la carcassa en forma de cargol el rotor de la turbina, els engranatges del grup multiplicador i la politja d'accionament

<https://www.autoanything.com/superchargers-turbochargers-intercoolers/61A6086A0A0.aspx>

- **2.2.1.3.2 Turbocompressors:**

**Compressor centrífug, dinàmic i d'accionament a reacció.**

**Cabdal molt alt i pressions mitjanes.**

**Resposta amb cert retard degut a l'impulsació dels elements rotatius per gasos.**

**Rang de treball ideal a règims mitjans i alts.**

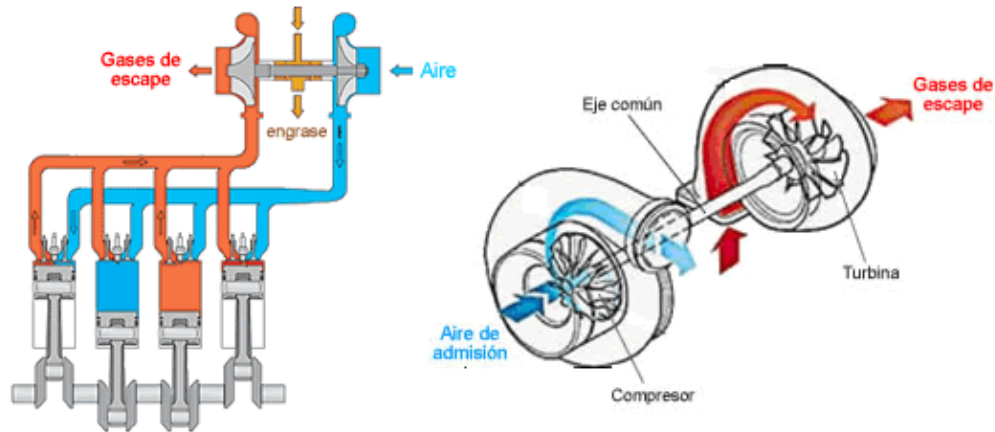
Aprofita part de l'energia que es malgasta de la fuga(de l'obertura de la vàlvula d'escapament) de l'expansió restant dels gasos en la cambra de combustió per impulsar una turbina que enllaçada mecànicament amb una altre especifica per comprimir l'aire que entra a través de l'admissió i així sobrealimentar el motor. Això es transforma en un augment en la potència i en l'eficiència del motor.

No existeix intercanvi de fluids d'una turbina a l'altre ni el flux és recirculant.

La gran majoria dels motors dièsel que munten els automòbils actuals compten amb un turbocompressor.

També els motors gasolina del corrent downsizing (reducció de mida dels motors) tendeixen a muntar-los, ja que amb una cilindrada petita i aplicant un turbocompressor

es poden obtenir grans resultats pel que fa a potència, eficiència i consum de combustible. Per no parlar de les versions esportives que munten turbocompressors com a manera d'obtenir potència amb grans pressions de treball amb peces capaces de suportar-ho d'altres prestacions ja encarat cap a competició.



Il·lustració 68 Funcionament esquematitzat del funcionament d'un turbocompressor.  
<http://www.aficionadosalamecanica.net/imagesturbo/turbo-principio-funcion1.gif>

Existeixen altres tipus d'aprofitament de la romanent expansió dels gasos cremants a la cambra de combustió i fora d'aquesta sense una turbina al col·lector d'escapament. És el cas del motor Ilmore que utilitza un pistó tanmateix com els que treballen en el motor on els gasos que encara cremen passen d'un cilindre funcional a la cambra d'aquest per generar un impuls extra. Un altre cas més conegut en l'aprofitament de la total expansió de l'explosió de la mescla es el motor Atkinson. Tractarem el temari amb més profunditat més endavant a l'apartat de "Combinació de conceptes d'altres models de motor".



#### **2.2.1.4 Compressors híbrids:**

- **2.2.1.4.1 Comprex:**

##### **Cabdal mitjà i bona pressió**

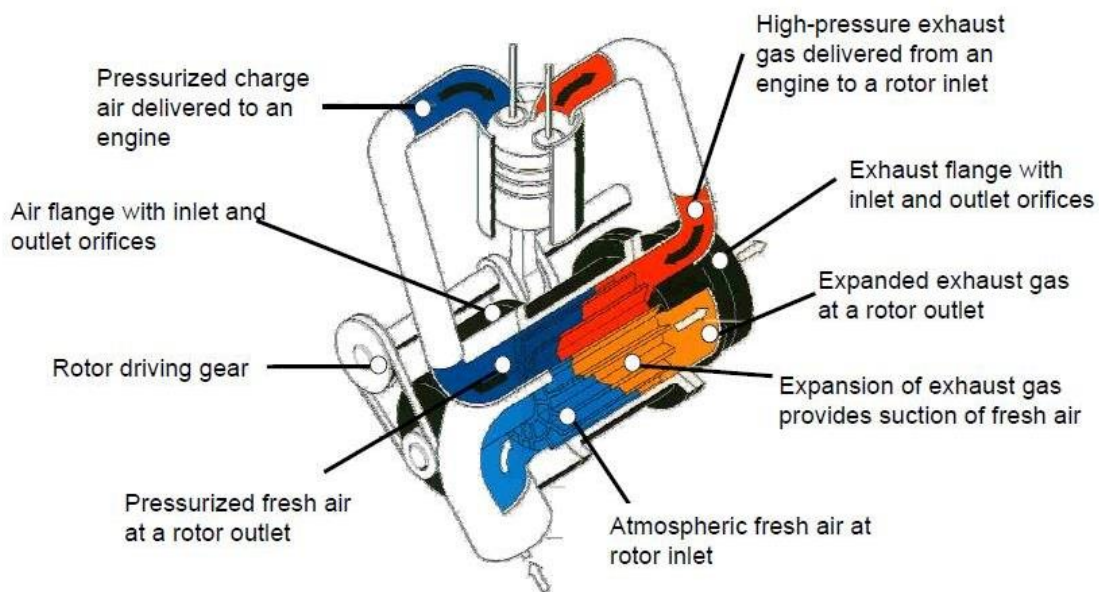
##### **Resposta ideal instantània a règims de motor baixos/mitjans.**

Es tracta d'un disseny híbrid entre els turbocompressors i els compressors volumètrics mecànics, aprofitant ambdues maneres de produir la inducció forçada. L'element principal es un rodet cilíndric amb canalitzacions passants de banda a banda, mentre aquest gira per l'accionament mecànic d'una politja els gasos provinents del cilindre motor calents i amb alta pressió s'introdueixen en el rodet guiats per uns ports fixes col·locats als extrems del rotor on els gasos calents empenyen per l'ona de pressió produïda l'aire fresc que es troba a l'altra meitat del rodet cap al motor. L'equilibri termodinàmic i el refredament dels gasos calents produeixen una contracció i en efecte una succió de l'aire fresc per iniciar el cicle.

En aquest procés l'aire fresc i els gasos de sortida estan en contacte però degut a les ones de pressió s'aparten mútuament, i el port o forat col·locats a la sortida de l'element giratori s'encarrega de deixar passar el fluid necessari a raó de l'angle de gir que dugui aquest actuant com una vàlvula. La coordinació de velocitat angular del rodet i la velocitat d'ona del fluid és clau per a l'eficiència òptima d'aquest sistema.

L'absorció de potència del motor és mínima ja que l'accionament té com únic objectiu mantenir al rotor en moviment giratori. La funció de compressió la segueixen realitzant de forma exclusiva els gasos d'escapament

Existeixen variants d'aquest model, el rodet cilíndric pot estar també mogut per una turbina tal com un turbocompressor en comptes de ser accionada mecànicament.



**II-lustració 69 Esquema del seguiment del flux dels gasos en un sistema comprex o altrament conegut com a rotor de pressió d'ones accionament mecànic.**

<https://www.researchgate.net/publication/271632645/figure/fig3/AS:669949123104788@1536739726397/Engine-fitted-with-pressure-wave-supercharger.jpg>

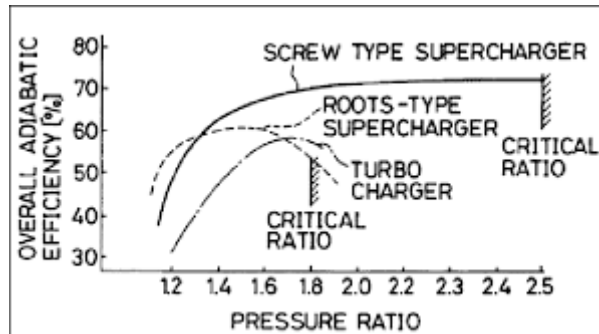
### 2.2.2 Diagrama comparatiu entre els diferents compressors volumètrics mecànics

A continuació veurem un diagrama basat en la pressió obtinguda, respecte l'eficiència adiabàtica.

De major a menor grau d'eficiència adiabàtica observem que en el primer lloc tenim el compressor de cargols o lynchholm que és un dels sistemes que no únicament desplaça l'aire sinó que al seu pas el comprimeix gràcies a la conicitat dels seus rotors helicoïdals, té un rati molt ampli de pressions amb una eficiència òptima, la majoria de compressors mecànics obtenen aquest ampli ventall de pressió ja que van propulsats pel motor i augmenten de revolucions de manera directament proporcional oferint un cabdal i pressió acord, tot comptant amb les limitacions de l'aparell.

Seguidament trobem el compressor de lòbuls o roots amb un rati més curt de pressions i una caiguda de l'eficiència adiabàtica notable que mostra una marcada línia d'actuació parabòlica. Per últim trobem el turbo carregador que ens mostra la menor eficiència, cal esmentar que aquest compressor treballa amb grans cabdals d'aire, aquest és el punt fort, per aconseguir una pressió òptima.

El rati crític que s'observa en el diagrama marca el límit on la màquina compressora comença a produir inestabilitats, retorns, escalfaments, pèrdues per excés de càrrega turbulenta, excés d'energia cinètica del fluid, etc.



II-lustració 70 Diagrama de l'eficiència adiabàtica envers el rati de pressió. [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTK1A6JqVc\\_4ousXnmhagxs8tYykUtPZnoc4e8jG\\_Ik3iE6Wf9W](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTK1A6JqVc_4ousXnmhagxs8tYykUtPZnoc4e8jG_Ik3iE6Wf9W)

A vegades l'eficiència adiabàtica no és la millor manera d'obtenir resultats ja que estem parlant sobre una transferència de calor amb l'exterior del sistema, en el cas ideal ( $Q=0$ , eficiència adiabàtica 100%) i no sempre ens interessa aquest punt de vista per temàtiques avaluable com cabdals i pressions de l'aire modificat en vers la temperatura en quant a densitat que afecta directament en el rendiment del motor.

### **2.2.3 Comportament de diferents sistemes de sobrealimentació sobre un MCIA**

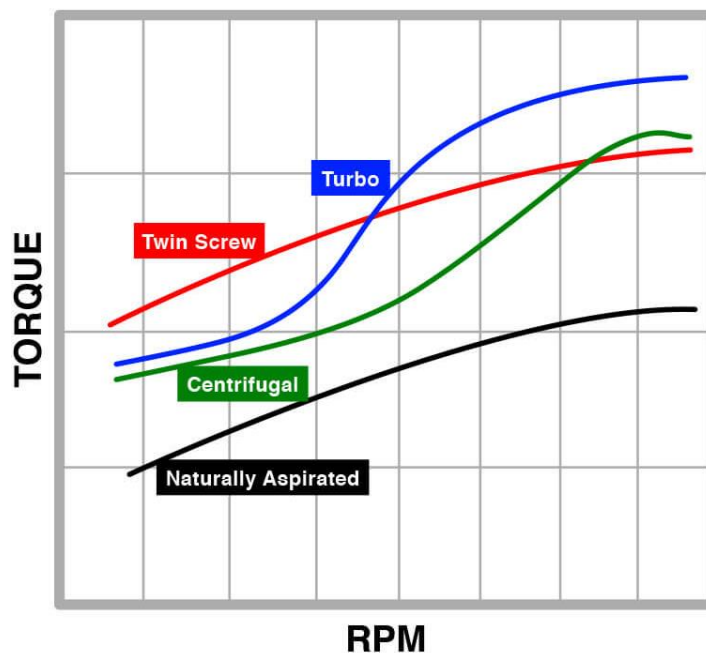
En el següent diagrama podem obtenir una comparació de comportament entre un motor de combustió atmosfèric (sense ajudes de sobrealimentació), amb compressor mecànic (dos tipus en aquest cas), i un compressor dinàmic.

S'avalua el parell motor respecte les revolucions d'aquest. Recordem que el treball a efectuar de compressió pel pistó en el cilindre es tradueix al parell del motor, per tant queda directament involucrada la pressió d'omplenat del cilindre que porti el compressor o element auxiliar en cas que n'hi hagi.

En general observem un increment del parell a mesura que el règim de voltes augmenta en tots els models exposats, aquest fet característic dels MCIA es produït per múltiples fets tals com l'augment d'energia cinètica dels elements rotatius a mesura que agafen velocitat, tanmateix com l'omplenat de la càmera que canvia segons la inèrcia de la massa dels gasos entrin a l cilindre, causa directa del creuament de vàlvules que està reglat per a un punt òptim de treball, etc.

Les corbes més lineals són les del motor atmosfèric( línia negra), i la del compressor de cargols (twin screw, en vermell) que es troba en paral·lel més amunt i és quasi idèntica.

Les corbes amb tendència exponencial són les turbines, ja sigui en la versió accionada mecànicament (centrifugal, en verd) o més pronunciat en el turbocompressor(blau).



**Il·lustració 71** Diagrama de parell produït envers les revolucions del motor amb diferents sistemes de sobrealimentació. <https://www.cjponyparts.com/skin/frontend/cj-pony/default/images/resource-center/articles/body/forced-induction-torque-curve-graph.jpg>

La corba característica d'un motor forma part de l'estudi científic del disseny d'aquest i tot i que no s'obté el resultat final fins a la pràctica directa sobre un dinamòmetre. És busca unes propietats úniques per a la tasca que vagi destinat el motor i que prenent de mostra les proves efectuades al llarg de l'història juntament amb l'enginyeria formen una

base sobre la que es pugui contornejar els detalls finals del model .

La corba característica, o si més no el comportament, és molt important ja que arriba a l'usuari final qui comanda el conjunt i pot sentir les diferents respostes del motor ja sigui en un vehicle, en maquinaria o indústria. El model que presentarem en aquest projecte té molt en compte aquestes sensacions.

#### **2.2.4 Alternatives no comuns de sobrealimentació. Sistema escollit.**

Per finalitzar aquest apartat informatiu del capítol dels sistemes de sobrealimentació comentarem que alguns dels compressors de desplaçament positius no han estat mai emprats en l'especialització de l'automoció com el compressor de rotor excèntric basat en el principi del motor wankel o el compressor d'èmbols usats en sistemes i instal·lacions d'aire comprimit; és en aquest punt on podríem plantejar una combinació de motor alternatiu i compressor d'èmbols aprofitant l'estructura del propi motor alternatiu, fonamentem així una de les bases de disseny del projecte Berdrod que explicarem més detalladament posteriorment.

Vegem les característiques generals d'un compressor de pistó o èmbols alternatiu en vers altres compressors volumètrics.

VOLUMÈTRICS					TURBOCOMPRESSORS	
Denominació	1. PISTÓ	2. CARGOLS "SREW"	3. PALETES	4. ROOTS	5. RADIAL (Centrífug Horit.)	6. AXIAL
Interval cabal (m <sup>3</sup> /min):	Fins a 350	Fins a 200	Fins a 200	Fins a 700	20 - 6000	600 - 31000
Pressió man. p <sub>2</sub> (bar)	Fins a 2000	2 - 30	Fins a 10	Fins a 2	0,4 - 70	Fins a 20
Règim de gir n (rpm):	400 - 2500	1000 - 25000	400 - 3600	600 - 3600	5000 - 80000	5000 - 25000
Refrigerat per:	Aire (o aigua)	Oli a pressió (aigua, aire)	Oli a pressió (aigua, aire)	Cap tipus	Aigua	Aigua
Lubricació:	Oli (alguns no)	Amb oli. Sense oli.	Amb oli. Sense oli.	Sense oli	Sense oli	Sense oli
Tipus de control:	Vàlvules a l'entrada	Vàlvules a l'entrada	Vàlvules a l'entrada	Vàlvules a l'entrada	Vàlvula entrada. Àleps directius a la sortida	Subministre continu

Il·lustració 72 Imatge agafada dels apunts de MATH de la Universitat Politècnica de Catalunya a Vilanova i la Geltrú.

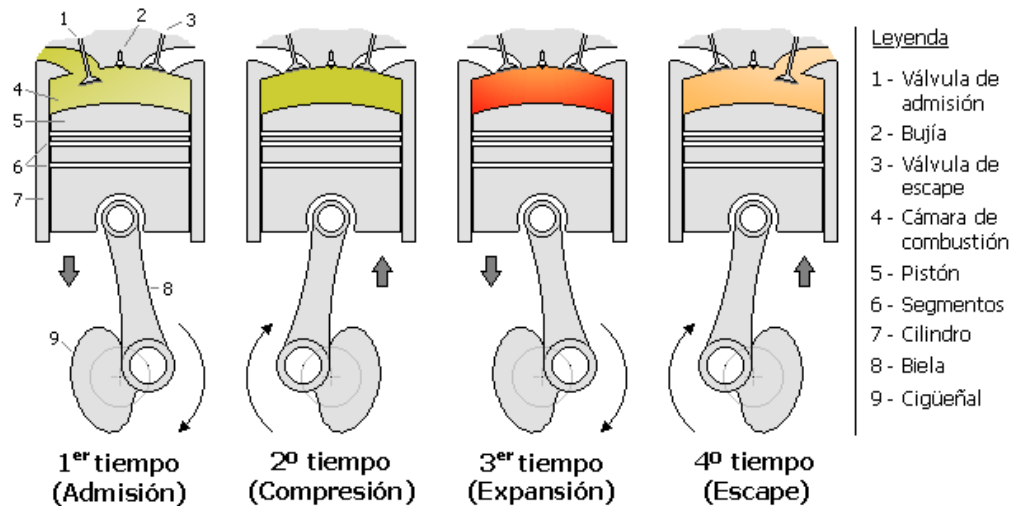
Podem observar que ofereix un cabdal superior amb un excel·lent rati de compressió amb un regim de gir de treball de 400 a 2500 voltes per minut, totalment dins del rang baix de gir d'un motor d'automòbil comú i tot i així segons el disseny de la seva geometria permet jugar amb els valors aconseguint rangs més elevats de velocitat angular de treball, doncs entren en joc temàtiques de principal afectació com la llargada de la cursa, la cilindrada, l'equilibrat dels elements, el diàmetre del pistó, etc.

### **2.3 Funcionament d'un motor MCIA de cicle Otto**

Per entendre el motor Berdrod es necessari tenir ben clar el concepte de motor tèrmic alternatiu Otto de 4 temps, doncs és basa en aquest.

El **motor otto** o **cicle de quatre temps** és un tipus de motor d'explosió que requereix quatre curses del pistó o èmbol (dues voltes completes del cigonyal) per a completar el cicle termodinàmic

1. **Primer temps o admissió:** en aquesta fase el descens del pistó aspira la mescla d'aire i combustible(o només aire segons quan s'afegeix el combustible). La vàlvula d'admissió es manté oberta, mentre que la de sortida està tancada. Al primer temps el cigonyal dóna 180°. L'arbre de lleves dóna 90°. La vàlvula d'admissió roman oberta. La seva cursa és descendent (En la posició del dibuix i de l'animació). Durant el temps d'admissió hi ha una depressió a l'interior del cilindre que provoca una succió dels gasos pel conducte d'admissió.
2. **Segon temps o compressió:** En arribar al final de cursa inferior, la vàlvula d'admissió es tanca, comprimint-se el gas contingut a la cambra per l'ascens del pistó. Al final del 2n temps el cigonyal porta recorreguts un total de 360° i l'arbre de lleves porta un recorregut de 180°. A més les dues vàlvules es troben tancades i la seva cursa és ascendent.
3. **Tercer temps o explosió:** En arribar al fi de carrera superior el gas ha assolit la pressió màxima. Als motors d'encesa provocada MEP, salta la guspira a la bugia provocant la inflamació de la mescla, mentre que als motors MEC, s'injecta el combustible que s'autoinflama per la pressió i temperatura existents a l'interior del cilindre. Als dos casos, una vegada iniciada la combustió, aquesta progressa ràpidament incrementant la temperatura a l'interior del cilindre i expandint els gasos que empenyen el pistó. Aquesta és l'única fase en la qual s'obté treball físic, les altres fases es duen a terme gracies a la inèrcia remanent de les peçes amb certa energia cinètica obtenida en aquesta fase. En aquest temps, el cigonyal dóna 180° amb un total de 540° mentre que l'arbre de lleves arriba 270 °C, les dues vàlvules es troben tancades i la seva carrera és descendent.
4. **Quart temps o d'escapament:** A aquesta fase el pistó empeny, en el seu moviment ascendent, els gasos de la combustió a través de la vàlvula d'escapament que queda oberta. En arribar al fi de carrera superior, es tanca la vàlvula d'escapament i s'obre la d'admissió, reiniciant-se el cicle. En aquest temps, el cigonyal, arriba als 360° i l'arbre de lleves dona 180° i la seva carrera és ascendent.



**Il·lustració 73** Cycle de quatre temps motor otto per ordre de dreta a esquerra amb les diferents peces del mecanisme de biela-manovella que formen un motor alternatiu de combustió interna tradicional.

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Motor\\_de\\_quatre\\_temps#/media/File:Ciclo\\_de\\_cuatro\\_tiempos.png](https://ca.wikipedia.org/wiki/Motor_de_quatre_temps#/media/File:Ciclo_de_cuatro_tiempos.png)

### 2.3.1. Cicle termodinàmic teòric Otto

Té sis transformacions termodinàmiques associades:

**0-1:** Admissió isòbara (a pressió constant).

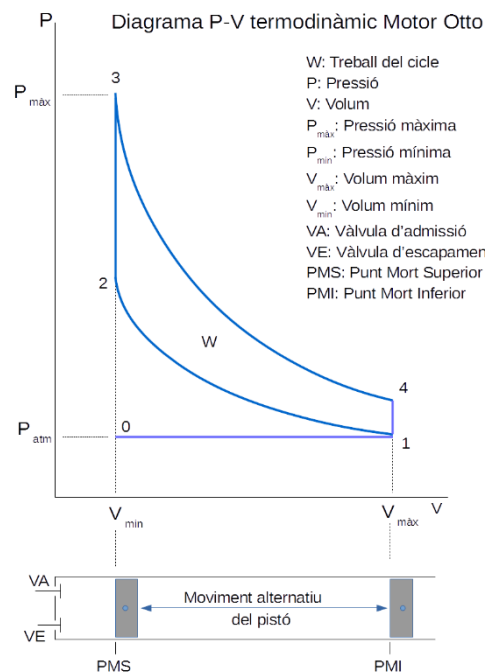
**1-2:** Compensió adiabàtica (sense intercanvi de calor amb l'exterior, això és un sistema aïllat)

**2-3:** Compensió isòcora (Augment de la pressió a volum constant provocat per la combustió).

**3-4:** Expansió adiabàtica. L'augment de la pressió ha provocat la baixada del pistó. Aquesta transformació és la que produeix un treball efectiu dins del cicle.

**4-1:** Escapament a volum constant. Baixa la pressió per l'escapament dels gasos. Transformació isòcora.

**1-0:** Escapament a pressió constant. Disminueix el volum per desplaçament del pistó. Els gasos d'escapament s'evacuen.



**Il·lustració 74** Diagrama termodinàmic teòric del cicle d'Otto. Les transformacions venen definides pels punts inicials i finals, 0,1,2,3,4.

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Motor\\_de\\_quatre\\_temps#/media/File:Diagrama\\_pv\\_otto.png](https://ca.wikipedia.org/wiki/Motor_de_quatre_temps#/media/File:Diagrama_pv_otto.png)

### **3. MOTOR DE COMBUSTIÓ INTERNA BERDROD**

El model Berdrod està basat en un motor de combustió interna alternatiu de quatre temps amb l'addició d'una distribució "metamorfòsica" de funcionament necessària per a l'ús polivalent dels seus cilindres amb la capacitat de la desconexió o de transformació individual oferint una dualitat de motor de combustió interna o bé de compressor volumètric per assistir-se a si mateix.

Per aquest prototip és necessari un mínim de dos cilindres de cilindrada idèntica per a que un pugui auxiliar a l'altre amb la sobrealimentació, per tant el model a estudiar més senzill es un model bicilíndric amb cilindres bessons, no obstant degut a les prestacions característiques (comentades a posteriori) s'escollirà treballar en un motor tetracilíndric ja existent.

Així doncs la descripció del funcionament del motor es basa en dues fases segons el règim de gir del motor i un punt ponderable de canvi de cicle. Explicarem l'evolució del motor a mesura que aquest augmenta la seva velocitat angular, o col·loquialment quan puja de voltes i augmenta les seves revolucions per unitat de temps.

Ens hem d'imaginar un tacòmetre conta revolucions que va augmentant de voltes on en la primera fase succeeix en un regim de gir baix en el qual un dels dos cilindres del nostre model bàsic actua com a motor sobrealimentat per l'altre que treballa com a compressor d'èmbols alternatiu. Tot seguidament a mesura que augmenta l'acceleració angular, el motor experimenta un punt crític de pas més o menys a la meitat del tacòmetre cap a la segona fase que es produeix en el rang més alt del conta-revolucions i que implica la transformació del cilindre que treballava de compressor com a motor quedant així tots els cilindres motrius, o el que vindria a ser un motor convencional de quatre temps Otto.

La pressió generada pel compressor és més que suficient i supera la compressió generada en la cursa del pistó motor, doncs el compressor efectua dues curses per al moment de explosió del motor.

El motor Berdrod estarà dotat de sistema intercooler o refrigerador dels gasos comprimits amb un radiador reforçat que al mateix temps actuarà de dipòsit per aconseguir una major linealitat en la dosificació de l'aire que descarregui, necessari en un compressor volumètric com el d'èmbols alternatiu.

Per a mantenir el control del sistema de sobrealimentació s'instal·la una vàlvula reguladora de pressió en el dipòsit del compressor que assegura i limita el sistema a una pressió segura per a l'alimentació del motor i que no es produeixin fenòmens no desitjats com l'autoencesa i l'auto-detonació de la mescla en el cilindre motor.



### **3.1 Previsions de comportament i eficàcia**

El funcionament dels cilindres motrius (motor bicilíndric sobrealimentat amb un compressor volumètric mecànic d'èmbols alternatiu) de la primera fase a règim baix de voltes aportaria una resposta del motor immediata i lineal (per ser compressor mecànic l'ajuda auxiliar) a l'actuació de l'accelerador i una reducció del consum i millora d'eficiència degut a la minimització volumètrica total i a un augment de la compressió final tanmateix com el parell; perfecte per a conducció en ciutat amb arrencades parades amb poques emissions i també conduccions sobre terrenys amb baix coeficients de fregament que requereixin una replica exacte a les rodes del vehicle el que estem transmetent al comandament de l'accelerador, comportament característic de motors d'un o dos cilindres.

Existeix un sistema de desconexió de cilindres en motors que munta el grup VAG d'automòbils que asseguren reduir el consum en ciutat i mostren la viabilitat del nostre projecte. Si es vol consultar un article detallat sobre la desconexió selectiva de cilindres aquí hi trobareu un link d'interès:

<http://www.blogmecanicos.com/2015/06/motor-con-desconexion-de-cilindros-tfsi.html>

La segona fase del motor a alt règim de voltes aniria destinada per a una conducció esportiva que requereixi l'elasticitat que la potencia de quatre explosions per cicle gracies a l'actuació de tots els cilindres que treballarien com a motor.

Un afer important a destacar, que es una de les condicions pilar del projecte per la pròpia construcció, és evitar les reaccions exponencials poc controlables de turbocompressors. Tot i que tenim ben clar que el rendiment és veurà marcat per aquesta decisió.

L'únic punt preocupant es el punt de canvi entre fases ja que es produiria un esglaonament en un diagrama de potencia-parell envers revolucions per unitat de temps previsiblement molt lineal i controlat en les dues seccions.

### **3.2 Potencial en els motors tetracilíndrics**

El fet que es dugui a terme l'estudi i el disseny del motor sobre un motor tetracilíndric recau en la necessària ajuda a baixos règims que conviu amb la espectacular potencia a alt règim de voltes en la majoria de motors actuals tetracilíndrics sobretot aquells que estan muntats en motocicletes de cilindrada mitjana i gran amb una increïble estirada amb rangs de treballs de fins i tot per sobre dels 12000 rpm o 14000rpm. La falta de força en rodades a baix règim és una tertúlia comuna en boca dels usuaris d'aquestes màquines de dues rodes. És cert que existeixen motors que es troben a mig camí entre el parell que ofereix un monocilíndric o un bicilíndric i la estirada de un tetracilíndric com venen a ser els motors tricilíndrics; no obstant amb el model Berdrod podem tenir les dues coses bones dels dos extrems de disseny i aconseguir un motor molt polivalent.

Per a poder entendre millor el concepte ordenarem els tipus de motor segons el numero de cilindres començant per el que presenten tendències amb més parell instantani i acabant pels que tenen més potencia:

MONOCILÍNDRIC → BICILÍNDRIC → TRICILÍNDRIC → TETRACILÍNDRIC →  
N CILINDRES → N+1 CILINDRES...



A mesura que incrementem el nombre de cilindres (tot depenent de la seva disposició angular en el cigonyal) el parell es va repartint al llarg del rang de treball del motor i acostuma a estar desplaçat el seu punt màxim més a altes revolucions, quedant una zona de baixes voltes empobrida en quant a força. Veiem a continuació dos pols oposats en quan a motors de motocicleta amb una cilindrada força semblant els dos amb quatre vàlvules per cilindre, motor lc4 de Ktm monocilíndric 640 en vers motor Honda cbr rr 600 tetracilíndric on veiem un clar rang òptim per a cada potencia i parell màxim:

Model	Ktm 640 lc4 supermotard (motor monocilíndric)	Honda cbr rr 600 (motor tetracilíndric)
Número de cilindres	<b>1</b>	<b>4</b>
Cilindrada [ cm <sup>3</sup> ]	<b>625</b>	<b>599</b>
Diàmetre cilindres [mm]	<b>101</b>	<b>67</b>
Carrera cilindres [mm]	<b>78</b>	<b>42.5</b>
Potència màxima [cv]	<b>53</b>	<b>120</b>
Règim de gir de potència màxima [r.p.m]	<b>6750</b>	<b>13500</b>
Parell motor màxim[N·m]	<b>60</b>	<b>66</b>
Règim de gir de parell màxim [r.p.m]	<b>5750</b>	<b>11250</b>

És evident que no es poden comparar els dos models de motors ja que existeixen masses variants que afecten al rendiment i son dissenyats per a coses totalment diferents però si ens dona una visió genèrica que s'acostuma a complir el comportament esmentat tot i compartir alguns dels rendiments que s'usen en l'estudi de màquines tèrmiques.

### **3.3 Ordres i seqüències de la distribució**

A continuació es mostren en el model de motor més basic els ordres i seqüències de la distribució i les fases segons el funcionament de dos cilindres amb desfasament de 180° al cigonyal:

**Fase 1:** Cil.1 treballant com a motor, Cil.2 treballant com a compressor.

Nº Cilindre	1	2
Aspiració	S'obre la vàlvula d'admissió mentre el pistó baixa.	Vàlvula de càrrega Berdrod* oberta, el pistó va pujant i es carrega el dipòsit del compressor.
Compressió	Es troben totes les vàlvules tancades i el pistó puja comprimint els gasos.	Vàlvula d'aspiració oberta omple el cilindre mentre el pistó baixa.
Combustió i expansió	Totes les vàlvules tancades i es produeix la ignició de la mescla de combustible i comburent que genera una expansió i energia, el pistó baixa.	Vàlvula de càrrega Berdrod* oberta, el pistó va pujant i es carrega el dipòsit del compressor.
Sortida	Vàlvula d'escapament oberta mentre el pistó puja i desplaça a l'exterior els gasos cremats.	Vàlvula d'aspiració oberta omple el cilindre mentre el pistó baixa.

\*Es reconeix com a vàlvula Berdrod aquella que participi directament en el procés d'adició o carrega/descarrega del sistema compressor.

**Fase 2:** Cil.1 treballant com a motor i Cil.2 treballant com a motor, ambdós desfasats 180 graus al cigonyal, la seqüència típica d'un motor de quatre temps.

Fases que es duen a terme simultàniament	
Cilindre 1	<b>Cilindre 2</b>
<b>Aspiració</b>	Compressió
<b>Compressió</b>	Explosió
<b>Explosió</b>	Sortida
<b>Sortida</b>	aspiració

### **3.4 Sistema de distribució a la pràctica**

Hem de comprendre que estem davant d'un sistema més complex de distribució que el d'un motor de quatre temps normal la qual cosa implica solucions innovadores pràctiques, el més senzilles possibles i viables econòmicament. Abans d'explicar les possibles implementacions comunes en el nostre motor, serien aplicables certes noves tecnologies com és el cas d'una culata amb un sistema de distribució de vàlvules comandat electrònicament, l'anomenat Freevalve timing System.

### **3.4.1 Freevalve timing System**

L'ús de la distribució comandada electrònicament de Christian Von Koenigsegg facilitaria molt les seqüències que les vàlvules que regulen el pas dels fluids als cilindres segueixen.

El concepte Freevalve, també conegut com a accionament de vàlvula totalment variable, ofereix la capacitat única de tenir un control independent de les vàlvules d'admissió i d'escapament. Per a qualsevol criteri de càrrega del motor, la distribució d'entrada i d'escapament es pot programar independentment. El sistema pot "decidir" en funció de les condicions de conducció que s'utilitzaran per maximitzar el rendiment o minimitzar el consum i les emissions de combustible. Això permet un major control sobre el motor que, al seu torn, proporciona importants beneficis de rendiment.

Freevalve utilitza actuadors electrohidràulics i pneumàtics combinats amb tècniques de sensor avançat.



Il·lustració 75 Culata seccionada amb detall de les vàlvules comandades electrònicament.  
<http://www.freevalve.com/technology/freevalve-technology/>

El sistema té un rang d'actuació tan ajustable de l'obertura de les vàlvules que pot eliminar-se el cos papallona d'estrangulament d'alguns models als que es vulgui adaptar aquest sistema de distribució electrònica

Tot i que el concepte d'actuació de la vàlvula totalment variable ha estat àmpliament assajat, cap fabricant ha pogut implementar-lo en producció a gran escala a causa de diversos problemes tècnics i per tenir un major cost. La tecnologia Freevalve mostra una gran promesa de superar aquests desafiaments d'una manera rendible.

### **3.4.2 Solució mecànico-hidràulica per a la distribució.**

Després de intentar per deu diferents maneres trobar una solució a la distribució el camí deriva per si mateix cap a una resposta mecànico-hidràulica comandada electrònicament, si més no a l'actualitat existeixen variants en el mercat actual de les quals podem treure una conclusió on és viable aquesta construcció per adaptar a mida pel projecte Berdrod.

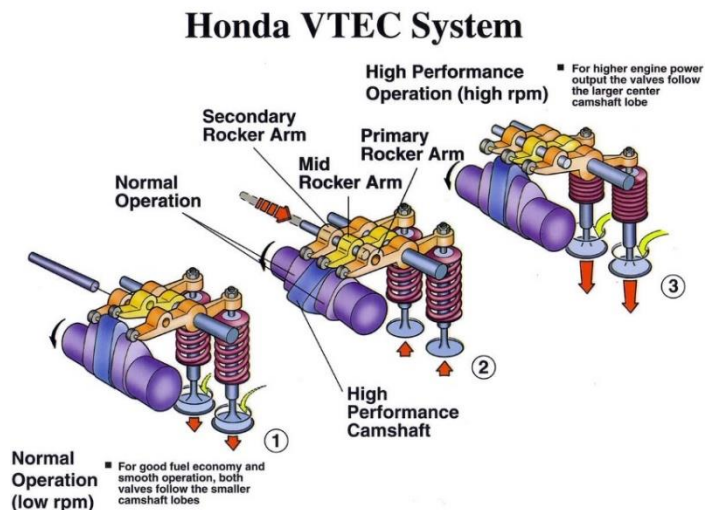
#### **3.4.2.1 Base VTEC**

La solució es basa en el sistema VTEC (Variable valve, Timing and lift, Electronic, Control), un sistema de distribució variable de les vàlvules d'un motor de quatre temps, desenvolupat per la marca Honda i introduït al mercat a l'abril de 1989. Es pot dir que el sistema original prové de la tecnologia REV (Revolution-modulated valve control) introduït a la motocicleta CBR400 el 1983, conegut com a HYPER VTEC.

Cada arbre de lleves (admissió i escapament) aportaria en el cilindre dues lleves cadascun, sent un total de quatre. En el cas d'un motor amb VTEC, hi ha una tercera lleva per a cada arbre. Aquesta lleva "extra" correspon a un perfil d'altres RPM, mentre que les altres dues a un perfil de baixes RPM.

Aquesta tercera lleva, té una forma diferent, és més agressiva, amb la qual cosa s'augmenten dues variables quan entra en acció: quant s'obre aquesta vàlvula i el temps que està oberta; que determina l'omplenat eficient de la cambra, ja que a mesura que l'aire entrant i sortint de la cambra pren velocitat pel fet de tenir massa augmenta l'energia cinètica i el seu comportament.

Aquesta lleva addicional està controlada per una electrovàlvula activada per la centralita del vehicle i envia pressió d'oli per fer solidàries les tres lleves mitjançant uns pins de bloqueig, aquesta electrovàlvula no deixa de ser un solenoide que actua d'aixeta commutadora amb una entrada d'alimentació, i una derivació per a l'execució del sistema o bé pel retorn de l'oli no usat del sistema de lubricació.



**Il·lustració 76 Actuació de les fases d'activació del VTEC segons el règim de treball del motor.**  
<https://espirituracer.com/reportajes/como-es-el-sistema-honda-vtec/#&gid=1&pid=2>

L'adaptació del sistema Berdrod es basa en suplantar la tercera lleva VTEC per una doble lleva per al mode de compressor, on la distribució hauria de girar a la mateixa velocitat amb les lleves normals que el cigonyal, cosa que no passa, van a la meitat de velocitat angular en el mode de motor Otto; d'aquesta manera implantant la doble lleva

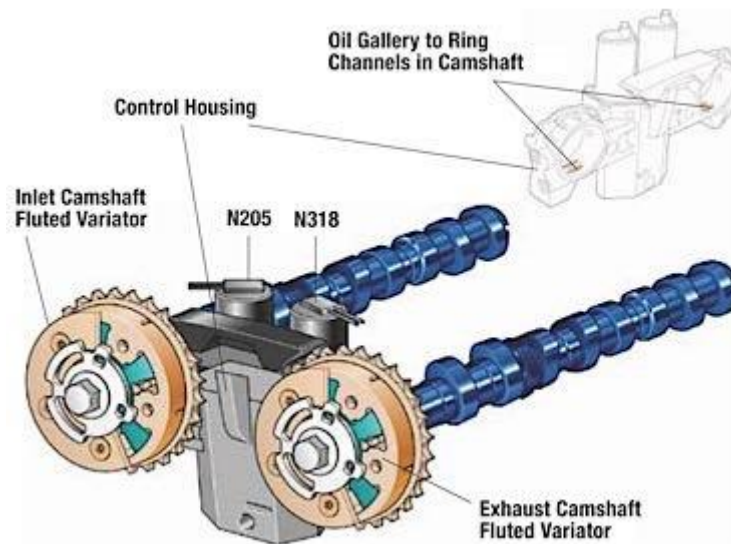
aconseguim pitjar les vàlvules dos cops per volta de l'arbre de lleves. D'altre manera hauríem de produir canvis de velocitat en els arbres de lleves; on afegir transmissions amb selectors faria difícil mantenir la sincronicitat en la distribució a part de generar un esglaonament molt marcat en el canvi de fase ja que existeix un temps de acceleració/desceleració per a entrar la velocitat d'engranatge pertinent.

#### **3.4.2.2 Base VVT (Variable Valve Timing)**

Existeix una altra solució amb ajuda hidràulica bastant òptima i és la de obtenir allà on hi ha una lleva fer una lleva dividida i que una de les meitats roti 180° mitjançant un rodet hidràulic amb pales internes que puigui girar respecte la carcassa exterior que seria el plat d'atac d'accionament de l'arbre de lleves de la distribució; produint d'aquesta manera el mateix efecte de doble lleva comentat anteriorment

Just abans de tocar el taqué/balanci la meitat de la lleva es desplaça en sentit contrari de gir que segueix l'arbre fins restar en una posició totalment oposada a la lleva fixe. D'aquesta manera obtenim una doble lleva i aconseguim pitjar les vàlvules un cop per volta i poder passar de mode motor a compressor.

Aquesta solució es basa en el sistema VVT(Variable Valve Timing) usat en distribucions variable mitjançant l'ajust de la rotació del arbre de lleves per efectuar el creuament de vàlvules corresponents i modular l'entrada i la sortida d'aire al cilindre segons la situació requereixi. Per a que el lector es pugui imaginar el funcionament basic es mostra la mecànica base per a facilitar la comprensió i adaptació al motor Berdrod.



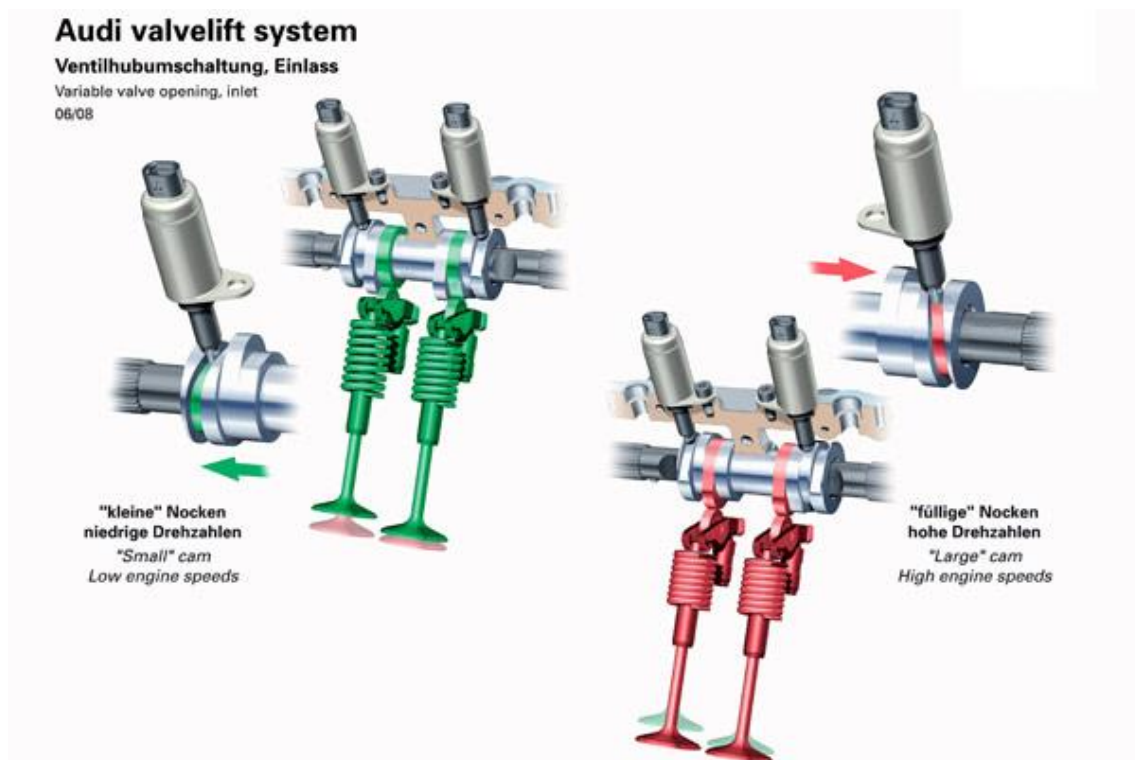
Il·lustració 77 Rodet hidràulic seccionat (color daurat) encarregat de moure l'arbre de lleves (en blau), observem que el fluid de color verd present en el rodet és l'oli del motor que mou el rotor empalat. <https://www.tomorrowstechnician.com/variable-valve-timing-import-vehicles/>

La diferencia entre aquest sistema recau en el rodet, que ha de permetre un gir de 180 graus tanmateix com una lleva partida que pugui rotar sobre l'arbre per al nostre motor.

### 3.4.2.3 Base sistema Cicle Budack VolksWagen

Per últim però no més exclòs, el sistema selector d' arbre de lleves lliscant de VolksWagen ens pot oferir una resposta molt simplificada a la nostre necessitat de fer intervenir una doble lleva. El sistema basic de la casa VW tracta com en el cas vtec amb dos jocs de lleves de desigual perfil destinades a règims i sol·licitacions diferents però en aquest cas per a gestionar un cicle 4 temps modificat el qual no entrarem en detalls ja que el que ens interessa es el mecanisme emprat.

Es tracta d'un arbre de lleves individual per a cada cilindre muntat sobre un eix en el qual llisca lliure però gira solidàriament a ell mitjançant un estriat. La manera de seleccionar les lleves es fa mitjançant l'ús d'un selector de pin retràctil que encaixa sobre uns rails marcats sobre aquest arbre de lleves mòbil, desplaçant el conjunt a mesura que gira i encarrila aquest provocant que quedi sobre el balancí/taqué a actuar la lleva corresponent.



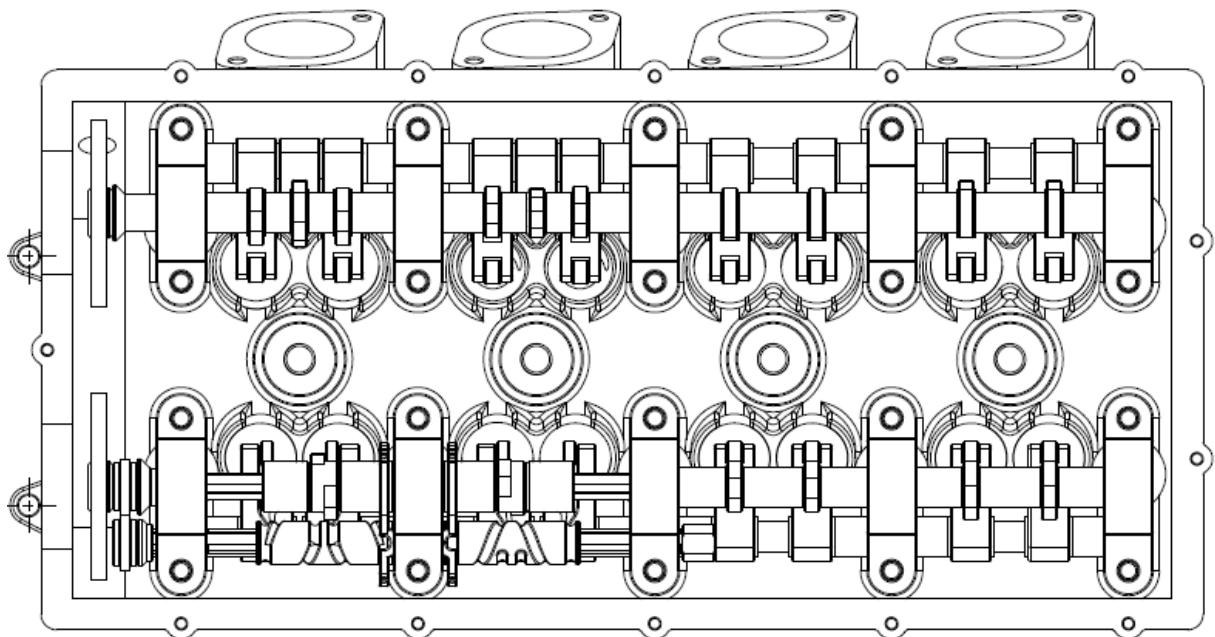
Il·lustració 78 Detall de l'actuació dels pins retràctils sobre els rails dels arbres de lleva.  
<https://www.ttforum.co.uk/forum/viewtopic.php?f=19&t=119463>

Es tracta doncs de modificar l'arbre de lleva i implantar la nostra necessària doble lleva per al funcionament en el canvi de motor a compressor del motor Berdrod que implicaria un rail amb un canvi de direcció molt més marcat per a que poguéssim efectuar el desplaçament del conjunt abans que no es trepitgés cap vàlvula.

### **3.4.3 Tria del sistema de distribució.**

Com ja hem comentat el sistema ha de ser el més senzill possible tot complint amb els requisits demanats i per això s'utilitzarà el màxim d'element compartits. Per exemple suposant una culata amb 4 vàlvules per cilindre dues de les quals són destinades a l'admissió en un motor de 4 temps s'aprofitarien per a la pròpia admissió del compressor. Per aconseguir-ho farem entrar en joc una doble lleva per adequar la distribució de motor a compressor emprant el mètode amb base V-TEC. Aquesta mateixa versatilitat de les vàlvules no és pot aprofitar en les d'escapament degut a les altes temperatures aconseguides en la zona, on el rendiment es veuria afectat, i dificulta l'arquitectura de la màquina havent d'implementar aixetes i bypass de difícils funcionament i major complexitat; en veure d'això omptem per a fer servir una de les dues vàlvules d'escapament en el que vindria a ser un motor convencional com a vàlvula berdrod usada per a la càrrega del dipòsit compressor. La respiració del motor es veurà afectada ja que reduïm una vàlvula, però lleument, doncs l'escapament produeix menys dificultats de buidat ja que el propi pistó bombeja els gasos d'escapament a l'exterior. Per aconseguir un mecanisme commutant que desactivi la vàlvula d'escapament i accioni la vàlvula que entra en joc en el compressor optem per un sistema basat en el disseny que s'usa en el Cicle Budack de VolksWagen amb pins elèctrics i lliscadors helicoidals.

Queda determinat doncs que en la cambra existiran dues vàlvules d'admissió polivalents, una d'escapament i una de càrrega pel compressor, en total quatre vàlvules per cilindre.



**Il·lustració 79 Font propia. Motor Berdrod. Dibuix de la vista superior de la culata destapada, es poden observar els elements de la distribució, en el quadrant superior esquerre l'adaptació per al model Berdrod en base V-Tech amb la doble lleva al mig de les altres lleves. En el quadrant inferior esquerre l'adaptació de Volkswagen d'arbre de lleves lliscant que actua de manera commutada per les vàlvules alhora que activa la doble lleva. La part esquerra és un motor comú de 4 temps.**



### **3.5 Models posteriors beta**

En vista que és un projecte que tracta un prototip mai fabricat es deixen escrites les innovacions que es podrien desenvolupar més endavant. No hem de perdre mai l'esperit de seguir avançant.

La primera millora del motor tetracilíndric seria fer-lo treballar amb dos cilindres motors, amb un d'aprofitament de l'expansió romanent dels gasos (com fan els turbocompressors), i amb un de compressor, degut a que un sol cilindre compressor te capacitat per a els dos cilindres motors d'aquesta manera s'aconseguiria un rendiment mes elevat amb el pistó recuperador dels gasos com en el motor ilmore explicat posteriorment.

No solament parlem de la capacitat de transformació de la maquina motriu si no que a més es planteja la possibilitat de construir un model posterior o beta amb un cilindre amb estructura allargada i l'altre superquadrat, destinat un per a regim de girs baixos i l'altre per a règims alts de revolucions respectivament, tot muntat sobre un cigonyal amb ponts de diferents altures desfasats 180° per al model bicilíndric bàsic on és generará l'estudi que més endavant multiplicará el nombre de cilindres segons les prestacions ofertes

Es sabut que un conjunt cilindre pistó d'estructura allargada, és a dir, de cursa superior al diàmetre del cilindre obtenen millors respostes i rendiments més alts en règims de girs baixos i que acullen bé la inèrcia dels gasos amb columnes d'aire llargues i primes. Per contrari un conjunt cilindre pistó superquadrat és aquell que el diàmetre del cilindre és superior a la cursa que recorre el pistó en el seu cicle; i que aquest per la seva geometria es molt més apte per a règims de gir alts on el pistó no ha de recórrer tant per canviar de sentit amb velocitats que en cas de ser allargat serien elevadíssimes i que costaria molt més de moure (a un mateix regim de gir de cigonyal el pistó del cilindre allargat assoleix una major velocitat en el punt mig de translació de la seva cursa que el superquadrat ja que la velocitat lineal que es transmet pel mecanisme biela-manovella al pistó del primer és a un radi major del cigonyal que el segon amb un cigonyal de radi més petit. Si els dos pistons tinguessin la mateixa freqüència, l'amplitud del allargat seria major que l'altre. No obstant degut als alts règims de treball dels motors superquadrats la velocitat dels pistons acaben sent majors en aquest que en els allargats). Apart d'això el fet de tenir una cursa petita implica una adequació per a treballar l'aire amb gran energia cinètica degut a la seva alta velocitat que implica l'adició de l'aire a la cambra mitjançant columnes d'aire amples i curtes amb gran cabdal, cosa que involucra que la culata disposi de canalitzacions a mida estudiades per a cada cas amb el pertinent desfasament de vàlvules per al correcte omplenat.

Així doncs la descripció del funcionament del motor es basa en dues fases com hem introduït segons el règim de gir del motor i un punt ponderable de canvi de cicle, on la primera fase de baix règim de voltes el pistó allargat treballa com a motor i el superquadrat com a compressor, tots dos amb un mateix cigonyal girant ala mateixa velocitat angular i es produeix una metamorfosis funcional per a la segona fase que es plantejaran diferents combinacions a espera de la cerca d'una solució òptima. Les opcions les plantejem a continuació:



**2na Fase Opció A:** Aquesta primera opció es la més senzilla de totes i es tracta de continuar emprant el cilindre allargat com a motor i aportar en aquest punt de canvi de fase l'altre cilindre superquadrat que abans exercia de compressor cap a motor, tot muntant sobre el mateix cigonyal i per tant amb la mateixa velocitat angular i desfasats  $180^\circ$ . L'únic punt desfavorable és que el règim de gir és elevat pel cilindre allargat i aquest trepitjaria la feina del cilindre destinat a altes voltes, tot i que s'assoliria un increment de potencia ja que en comptes de tenir una explosió per cada volta donada al cigonyal en tindríem dues.

**2na Fase Opció B:** Aquesta segona opció planteja la segona fase amb una reducció a la meitat de la velocitat angular del cilindre allargat per a mantenir aquest com a motor i treballa paral·lelament. D'aquesta manera el cilindre allargat no trepitjaria el cilindre superquadrat i s'assoliria un punt de màxima velocitat angular superior.

**2na Fase Opció C:** Aquesta opció pren el concepte viscevers de la primera fase i fa que entre el cilindre allargat i superquadrat es canviïn les funcions quedant en aquesta fase el cilindre destinat a alts règims com a motor i l'altre com a compressor.

**2na Fase Opció D:** Aquesta opció pren el concepte viceversa de la primera fase i fa que entre el cilindre allargat i superquadrat es canviïn les funcions quedant en aquesta fase el cilindre destinat a alts règims com a motor i l'altre com a compressor però tot reduint a la meitat la velocitat del cilindre compressor (cilindre allargat). Tot i així l'omplenat del cilindre motor seria la pròpia cursa (admissió atmosfèrica) més l'adició d'una cursa del cilindre compressor deixant així un total de 2 curses volumètriques que serien suficients per a un bon rendiment.

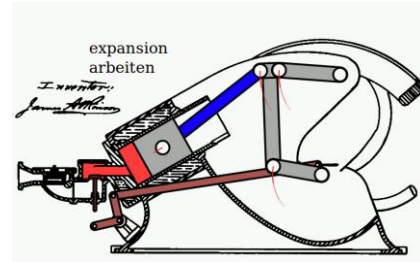
Una altra possibilitat a estudiar seria el moment d'adició d'aire comprimit a la cambra de combustió, doncs caldria veure segons diferents situacions que seria més òptim si injectar l'aire just quan tenca la vàlvula d'admissió o bé quan gairebé el pistó estigui arribant al punt mort superior en el temps de compressió per estalviar comprimir tant d'aire en condicions de demanda baixa de potencia i parell i ajudar la homogeneïtzació de la mescla per la turbulència generada. La pressió generada pel compressor és suficient per superar la compressió generada en la cursa del pistó motor doncs el compressor efectua dos curses per al moment de explosió del motor.

### **3.5.1 Combinació de conceptes d'altres models de motor**

Existeixen altres motors dels quals podem recollir algunes idees i adaptar-les al motor Berdrod ja que aquest per la seva constitució ens ofereix aquestes implantacions que s'exposaran. Vegem primer els models alternatius:

### **3.5.1.1 Atkinson/Miller**

Cicle del motor Atkinson/Miller Contempla el retard de les vàlvules de admissió mentre puja el pistó per comprimir-se menys per estalviar esforç de compressió i adaptar d'alguna manera el cicle mecànic original de biela composta.

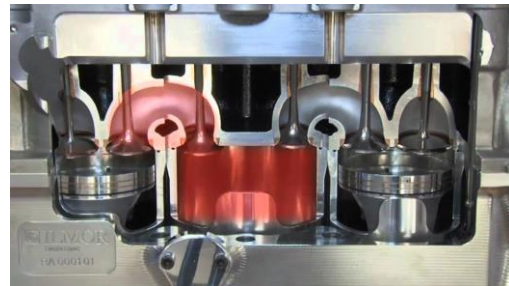


**Il·lustració 80 Sistema de biela composta que genera una carrera disminuïda per a la compressió i un llarga per a l'expansió i així aprofitar tota aquesta.**

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Cicle\\_Atkinson#/media/File:Atkinson\\_Engine\\_with\\_Intake.gif](https://ca.wikipedia.org/wiki/Cicle_Atkinson#/media/File:Atkinson_Engine_with_Intake.gif)

### **3.5.1.2 Motor Ilmor**

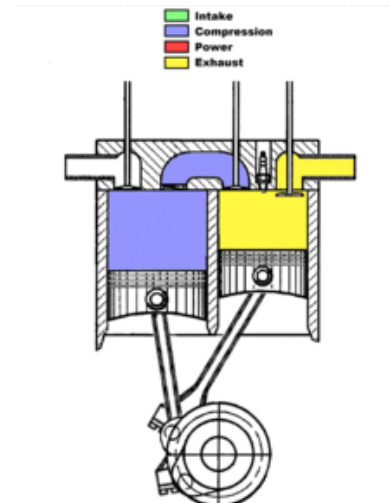
Aquest aprofita els gasos que s'expandeixen del escapament en un tercer cilindre de baixa pressió (com un turbocompressor però en ves de rotatiu, alternatiu).



**Il·lustració 81 Motor ilmore Tenyit de vermell és mostra el pas dels gasos del cilindre esquerre al cilindre de baixa pressió.** <https://www.youtube.com/watch?v=u0uPmrSRM7w>

### **3.5.1.3 Motor Scuderi**

En aquest motor la feina d'admissió, compressió, combustió, i escapament està repartida en dos pistons units al cigonyal amb un desfasament característic que permet que un pistó treballi de bomba de renovació de carrega per l'altre que només efectua explosió i escapament dels gasos. El pas de la compressió entre un pistó i altre el fa difícil.



**Il·lustració 82 Motor Scuderi.**  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Scuderi\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Scuderi_engine)

#### **3.5.1.4 Propostes i idees compratides**

Per començar la idea del motor sobrecomprimit per si mateix la podríem trobar extreta del el motor Scuderi, no obstant cal saber diferenciar, doncs aquest no segueix un cicle de 4 temps i no es considera una sobrecompressió, únicament la feina que un pistó fa en un motor convencional es divideix per a dos pistons en un Scuderi. És una bona idea usar el cilindre com a bomba, però es perd moltíssima eficiència tèrmica i dinàmica entre traspassos de fluid.

Com a primera proposta es podria retardar el tancament de vàlvules com es fa ja en motors Otto normals simulant el cicle Atkinson/Miller per a demandes de baixes prestacions.

Com a segon sistema afegit, en condicions d'alt rendiment i entrega total de potencia/par, amb els pistons no bessons (sistema explicat en l'apartat de models posteriors beta)

Així doncs en aquestes condicions a alts règims de voltes es una bona solució aprofitar el pistó 1 de baixes (llarga carrera i diàmetre petit) que no treballa bé a altes revolucions com a motor i com a compressor esdevé un baix rendiment, utilitzar-lo com en el motor ilmore per a aprofitar els gasos que s'expandeixen provinents del pistó 2 de altes revolucions que en aquell instant estaria treballant com a motor tèrmic.

#### **4. ESTUDI DE LA CAPACITAT DEL CICLE I MODELITZACIÓ NUMERICA DEL MOTOR**

Per a poder obtenir una visió aproximada del comportament del motor Berdrod i obtenir una base de treball s'opta per a realitzar un estudi sobre un motor ja existent i així poder generar una comparació en les seves corbes característiques, ja que el nostre model usa també el motor comú de 4 temps en la segona fase de treball. El motor escollit és el d'una motocicleta marca Suzuki model GSR 600, una motocicleta de carrer amb tendència esportiva. Es tracta d'un motor tetracilíndric.

La fita principal dels càlculs és trobar el treball total i la calor total del cicle tancat d'on s'extrauran la potència, el parell i el consum del model estudiat.

##### **4.1 Hipòtesis i definicions prèvies:**

L'Estudi es basa en la fase tancada del cicle termodinàmic (procés de combustió) i no en la oberta les quals acull les fases d'admissió escapament, es a dir, sí que té en compte la renovació de la càrrega però no és objecte d'estudi.

La primera consideració a tenir en compte es que existeixen diferents mètodes i camins per a desenvolupar una modelització numèrica que defineixi el model buscat, i s'exposa això ja que segons el grau d'aproximació al model real i això li precedeix la extensa complexitat i la desconexió de molts dels paràmetres que només s'extreuen de manera experimental o que estan directament enllaçats equacionalment amb altres incògnites impossibilita la creació d'una predicció idèntica a la real.

##### **4.1.1 Referent al fluid motor:**

- El fluid que utilitza el compressor és aire sec amb comportament de gas ideal.
- El fluid motor està compost per una barreja homogènia d'aire i benzina, de comportament símil a una barreja de gasos ideals, així que es regeixen per les lleis de càlcul de gas ideal per a l'obtenció d'altres variables, com ara la pressió o la temperatura tot tenint en compte el tipus de procés (isocòric, isobàric, adiabàtic isentròpic o politròpic...).
- El fluid motor presenta les mateixes característiques a tot el recinte físic on sigui comprès.
- En les fases de compressió i expansió es considera que la calor molar a pressió i a volum constant no depèn de la temperatura, escollint adequadament els coeficients politròpics constants durant l'evolució d'aquests processos.
- De la mateixa manera les capacitats calorífiques de cada element es mantenen al llarg de l'evolució del procés tot i que canviï la temperatura. Per al càlcul d'aquestes capacitats es proposa una temperatura mitja.
- Per al càlcul de l'increment de temperatura sofert pel fluid motor en la fase de combustió es considera que la calor molar a pressió i a volum constant depèn de la temperatura, tal com passa quan es treballa amb gas ideal.
- No hi ha intercanvi de massa amb l'exterior durant la fase tancada, és a dir, tant la vàlvula d'admissió com la d'escapament es troben tancades completament en

tot moment i no hi ha fuites a través del joc existent entre el pistó i el cilindre (anells d'estanqueïtat).

- El comportament del fluid motor durant la combustió es considera turbulent, tal com passa en la realitat a causa de l'anisotropia de les seves components de velocitat.
- Es tracta d'una mescla la qual conté un combustible amb suficient octanatge i resistència a la detonació per a que el procés d'aportació de calor s'activi i s'iniciï per guspira, és a dir que treballem en un motor d'encesa provocada.

#### **4.1.2 Consideracions varies:**

El model escollit després d'una intensa recerca és un model que divideix l'estudi de fase tancada en tres subfases: Compressió, combustió i expansió; i que discretitza grau a grau la distància angular que el cigonyal recorre i per punt el desplaçament del pistó en cada instant i acomplir així els processos integrals de manera fidel.

Es tracta d'una recreació matemàtica que contempla les pèrdues de calor que existeixen en els processos reals no adiabàtics, es a dir politròpics i amb transferència de calor per convecció del fluid a les parets del cilindre.

Per al anàlisi del mecanisme i la evolució dels processos termodinàmics que es duren a terme es generarà una discretització de diferencial d'un grau per a aproximar al màxim el model teòric a la realitat. Contemplant així funcions com la calor o el treball total que són funcions de trajectòria el valor de les quals depèn dels estats inicial i final, així com també del camí o trajectòria seguida pel sistema per anar d'un estat a l'altre.

Les pèrdues mecàniques produïdes per fregaments es tenen en compte amb un rendiment mecànic aplicat posteriorment.

No es tenen en compte les pèrdues de fricció per viscositat del fluid o es contemplen dins les pèrdues mecàniques.

Les pèrdues de renovació de càrrega es contemplen amb el corresponent rendiment volumètric i els avançaments i retards de les vàlvules que comanden la distribució.

El diàmetre del cilindre és igual al diàmetre del pistó.

El cicle del motor 4 temps es du a terme en 720 graus dividit segons les fases esmentades en l'apartat *el funcionament del motor 4t Otto*.

#### **4.2 Cinemàtica del mecanisme**

El mecanisme del motor Berdrod no difereix en res del de un MACI (motor alternatiu de combustió interna) convencional.

Es tracta d'un mecanisme biela-manovella que transforma el moviment alternatiu de translació lineal del pistó que llisca a l'interior del cilindre en un moviment rotatiu del cigonyal o manovella amb la interacció entremig de la biela que descriu un moviment

compost de translació més rotació.

#### 4.2.1 Parametres fonamentals:

**h:** cursa del pistó (m)

**D:** diàmetre del cilindre (m),  $D=0.064m$

**l:** longitud de la biela (m),  $l=0.123m$

**R:** radi de la manovella (m),  $r=0.02125m$

**[1]**  $h = 2 \cdot R = 0.0425m$

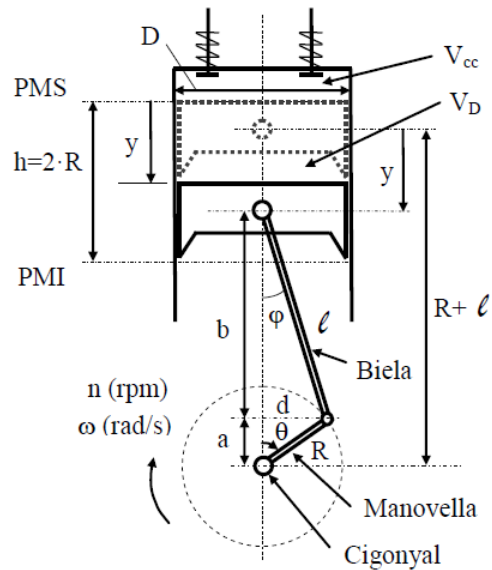
**y** o bé **x:** posició del pistó des del PMS (m)  
depenent del grau girat,

**[2]**  $x(\theta) = l + R - R \cdot \cos \theta - \sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta}$

**$\theta$ :** angle de gir del cigonyal( $^\circ$ )

**n:** règim de gir del motor(rpm, rps o rad/s)

**$\omega$ :** velocitat angular de rotació del cigonyal  
(rad/s), **[3]**  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$



Il·lustració 83 Longituds participants en el mecanisme biela-manovella. Extret dels apunts de MATH de La universitat politècnica de Catalunya a Vilanova i la Geltrú.

**V<sub>cc</sub>:** volum cambra combustió (m<sup>3</sup>), a partir de la eq. **[5]**  $V_{cc}=11.98cm^3$

**V<sub>D</sub> o V<sub>max</sub>:** Volum de la cilindrada unitaria (m<sup>3</sup>) a partir del nombre de cilindres "z" es calcula

**[4]**  $V_{total} = V_D \cdot z \Rightarrow V_D = \frac{V_{total}}{z} = \frac{599}{4} = 149.75 cm^3$

**r:** Rati de compressió, **[5]**  $r = (V_{cc} + V_D) \div V_{cc}$

**Cm:** Velocitat lineal mitjana del pistó, **[6]**  $Cm = 2 \times h \times n$

**Ap:** area del pistó **[7]**  $Ap = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$

**V( $\theta$ ):** Volum total del recinte segons la posició angular del cigonyal

**[8]**  $V(\theta) = Ap \cdot x(\theta) + V_{cc}$

On el volum que es escombrat pel pistó és: **[9]**  $V_{cil} = Ap \cdot x(\theta)$

#### 4.3 Termodinàmica del sistema

Aquest apartat va dedicat a l'estudi més centrat del fluid (aire o mescla), presentem a continuació els paràmetres que ens seran útils més endavant, prego que el lector vagi assimilant les definicions i sigui pacient per arribar al moment d'ús on s'explicarà detalladament les raons de càlcul.

#### 4.3.1 Paràmetres fonamentals

Començarem per les capacitats calorífiques de l'aire i de la mescla amb el combustible. El model teòric l'iniciem amb benzina 95 octans com a combustible per la senzilla raó de donar validesa al programa numèric generat contrastant dades amb el model real del motor. Algunes de les característiques del combustible:

El nombre de mols de mescla que hi caben en el nostre cilindre i que per tant actuaran es un dels primers paràmetres a calcular i es calcula a partir de la llei dels gasos ideals  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

$$[10] n_m = n_b + n_a \quad [11] Fe = \frac{m_{combustible}}{m_{aire}} \quad [11.1] Fe \cdot \frac{m_a}{m_b} = n_b/n_a$$

#### 4.3.2 Equilibri químic de la mescla de combustible i comburent

Composició química del combustible: Benzina  $C_8H_{16}$ , amb massa molar  $M_b=112$  [Kg/Kmol].

Per a una reacció amb comburent: Aire ambient  $O_2+3.76N_2$  (simplificat)

El dosat estequiomètric amb un hidrocarbur on  $x=$  nombre d'àtoms de carboni, i  $y=$  nombre d'àtoms hidrogen, i  $a=x+y/4$ :

$$[11.2] Fe = (12 \cdot x + 16)/(a \cdot (32 + 3.76 \cdot 28))$$

$$Fe=(12 \cdot 8+16)/(12 \cdot (32+3.76 \cdot 28))=0.06798756799$$

A partir d'aquí podrem saber la quantitat en massa de combustible que entra al cilindre si sabem el nombre de mols i la massa molar:

$$[12] m_b = M_b \cdot n_b$$

Per a saber la quantitat de massa de comburent que entra al cilindre l'equació [12] es aplicable a l'aire quedant:  $m_a = M_a \cdot n_a$

La Massa molar del conjunt mescla sobte a partir de les fraccions màssiques de cada component que multiplica alhora per cada un dels seus pesos molars:

$$[13] M_m = y_b \cdot M_b + y_a \cdot M_a \quad [13.1] y_b = n_b/n_m \quad y_a = n_a/n_m$$

#### 4.3.3 Calors específics $C_p$ i $c_v$

- Per a la benzina:

Per al calor molar a pressió constant de la benzina vaporitzada s'empra la següent equació:

$$[14] C_{p,benzina}(T[K]) = 4.1868 \cdot [A_1 + A_2 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right) + A_3 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + A_4 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3 + A_5 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^{-2}]$$

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
$T < 1000$ K	-24,078	256,63	63 -201,68	64,75	0,5808



Seguidament deduïm el calor molar a volum constant:

[15]  $C_v = C_p - R_b$  Constant específica del gas: [15.1]  $R_b = R_{universal}/M_b$

- Per a l'aire:

Per a l'aire definit com a sec i com a una mescla de gasos el conjunt dels quals dona lloc a un pes molar  $M_{aire}=28.962 \text{ [Kg/Kmol]}$  s'ha optat per a l'obtenció del calor molar a pressió constant segons la temperatura una equació d'ajust anomenada NASA que es basa en unes taules de referència JANAF, aquesta és:

[16]  $C_{p,aire}(T) = R_{universal} \cdot (a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot T^4) [\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$

On la constant de la gasos universal té un valor de  $R_{universal} = 8,314472 \text{ [J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$  i les constants "a<sub>n</sub>" són les següents:

	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>
T < 1000 K	3,5683962	-6,7872943·10 <sup>-4</sup>	1,5537148·10 <sup>-6</sup>	-3,2993706·10 <sup>-12</sup>	-4,6639539·10 <sup>-13</sup>
T > 1000 K	3,0879272	1,2459718·10 <sup>-3</sup>	-4,2371895·10 <sup>-7</sup>	6,7477479·10 <sup>-11</sup>	-3,9707697·10 <sup>-15</sup>

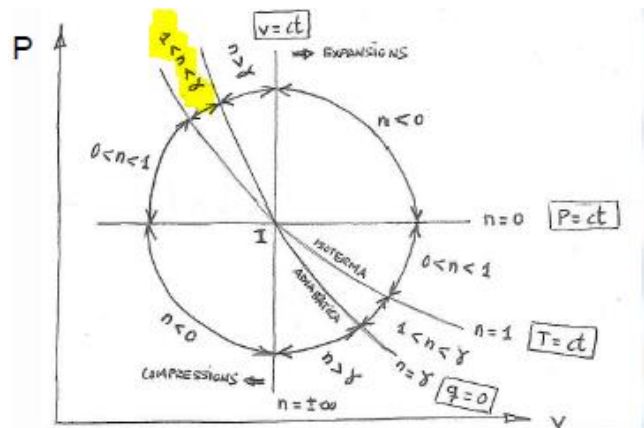
Les equacions [15] i [15.1] són també aplicables per al càlcul de l'aire.

#### 4.3.4 Constant Adiabàtica i politròpica.

Per últim definim la constant adiabàtica k : [17]  $k = C_p/C_v$

El procés que més s'adequa a la realitat en la compressió i la expansió del cicle contempla la pèrdua de calor amb l'exterior, Aquest és el politròpic. En els processos politròpics, amb sistema reversible tancat, els gasos ideals segueixen l'equació: [18]  $P \cdot V^n = ct$

Si el procés es pròxim a l'adiabàtic, es a dir, el sistema té tendència a no intercanviar calor amb l'exterior l'exponent "n" tendeix a "k" constant adiabàtica; de manera contraria "n" tendeix a la unitat si estem davant d'una isoterma on no hi ha variació de calor en el sistema doncs tota la calor generada és extreta a l'exterior.



II-lustració 84 Diagrama Pressió-volum i l'efecte de la constant politròpica en els dos extrems, adiabàtic o isotèrmic. Q:calor,T:temperatura, n:exponent politròpic, gamma-k: exponent adiabàtic, P: pressió, V: volum. Imatge extreta dels apunts d'ETMF impartida a la UPC de Vilanova i la Geltrú.

Els paràmetres termodinàmics que resten s'explicaran juntament amb el procés pertinent doncs s'adequa a mida segons la llei d'aquest.

#### 4.4 Compensió politròpica

S'ha escollit un compressió politròpica perquè com ja s'ha comentat és el procés més símil a la realitat.

Relació P-V, de l'equació [18] obtenim la següent: [19]  $P_2/P_1 = V_1^n/V_2^n$

Relació P-T: [20]  $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n}$

Relació T-V: [21]  $T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{(n-1)}$

Treball del sistema tancat: [22]  $W = -\frac{1}{n-1} \cdot (P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1)$

A partir d'aquí aplicarem les equacions anteriors de cada estat per cada grau girat del cigonyal prenent com a valor inicial "1" el grau actual i el final "2" com el següent o l'anterior depenent de la naturalesa de desenvolupament del procés.

La discretització grau a grau permet obtenir un diferencial de volum prou petit respecte el procés final per a poder aplicar de manera simplista i imitar la integració d'algunes equacions que ho requereixin. L'altre raó de discretització es per les funcions de trajectoria com la calor:

$$[23] q_c = \frac{(k-n_c) \cdot N_{mols} \cdot R}{(k-1) \cdot (n_c-1)} \cdot (T_1 - T_2) \quad [24] Q_c = \sum_{\theta i+1}^{\theta i} q_c(\theta)$$

On "k" és la constant Adiabàtica, "n<sub>c</sub>" la constant politròpica de compressió escollida amb un valor de n=1.25, "q<sub>c</sub>" és la calor despesa entre dos estats i "Q<sub>c</sub>" és la suma de totes les calors en un total de 180 estats així com 180° dura la compressió.

Les temperatura i la pressió inicial s'extreuen dels valors que el programari de la centraleta de la motocicleta adopta quan hi ha dispositiu de lectura de pressió(IAPS, intake aire pressure sensor o sensor de pressió d'admissió) i temperatura (IATS, intake air temperatre sensor o sensor de temperatura d'admissió) fet malbé i aplica el valor mitja més polivalent per a fer funcionar el vehicle. En aquest cas aplica els valor de P<sub>adm</sub>=101325Pa o 760mmHg i T<sub>adm</sub>=40°C o 313.15K.

IAT sensor	Intake air temperature value is fixed to 40 °C.
IAP sensor	Intake air pressure is fixed to 760 mmHg.

Il·lustració 85 Imatge retallada del punt 4-20 del manual de taller de la Suzuki GSR 600

En una compressió normal en un motor definida per les equacions [8], [4] i [5] el volum 1 inicial es el del cilindre V<sub>D</sub>=149.75cm<sup>3</sup> i el volum 2 final deduït segons la relació de compressió r=1/12,5 => V<sub>c</sub>=11.98 cm<sup>3</sup>.

En la compressió del compressor s'ha de contemplar el circuit sencer del sistema pel fet de ser un sistema semitancat amb passos cap a altres cambres així doncs per l'equació número [8] s'han generat dues variants per a les diferents situacions que es presenten en aquest procés de reducció de volum de l'aire del compressor que sobrealimenta el nostre motor.

S'ha adaptat el volum instantani segons la equivalència corresponent amb el cabal volumètric i màssic aprofitant que és un compressor volumètric semitancat de massa definida, ja que el desplaçament generat per les dues curses obtingudes pel compressor amb un consum del cilindre motor que gasta una cursa s'opta per adaptar aquesta equació amb la finalitat de simplificació.

A més es presenten dues possibilitats d'estudi, el pas directe de compressor a motor, o amb un dipòsit o intercooler entremig, la qual cosa exigeix la reescriptura de la fórmula.

- Per a un primer cas hipotètic d'una sobrealimentació directe al cilindre motor es diferencien el volum inicial 1 i el volum final 2:

$$V_1 = V_{D \text{ compressor}} + V_{D \text{ motor}}$$

Com que els dos cilindres són bessons,  $V_{D \text{ compressor}} = V_{D \text{ motor}} \Rightarrow V_1 = 2V_D$

El volum final serà el volum inicial menys les dues curses que el pistó del compressor escombra ( $V_{cil}$ ).

$$V_2 = V_1 - 2V_{cil} = 2V_D - 2V_{cil} = 2 \cdot (V_{cil} + V_{cc}) - 2V_{cil} = 2V_{cc}$$

La equació que descriu aquest comportament per cada grau girat al cigonyal és:

**[8.1]**  $V(\theta) = [Ap \cdot x(\theta)] \cdot 2 + 2V_{cc}$

- Per a un segon cas d'una sobrealimentació amb sistema d'emmagatzematge i refredament amb dipòsit-intercooler es diferencien el volum inicial 1 i el volum final 2:

$V_i$ : volum dipòsit-intercooler.

$$V_1 = 2V_D + V_i$$

$$V_2 = V_1 - 2V_{cil} = 2V_D + V_i - 2V_{cil} = 2 \cdot (V_{cil} + V_{cc}) + V_i - 2V_{cil} = V_i + 2V_{cc}$$

La equació que descriu aquest comportament per cada grau girat al cigonyal és:

**[8.2]**  $V(\theta) = V_i + 2V_{cc} + 2Ap \cdot x(\theta)$

#### **4.5 Combustió**

S'ha escollit per a la combustió un model amb càmera de volum variable i pressió canviant com succeeix a la realitat, doncs la combustió a volum constant del cicle ideal otto no existeix com a tal pel fet que aquesta aportació d'energia no és instantània i té cabuda en un temps de combustió i espai o recorregut del cigonyal el valor del qual hem triat  $60^\circ$  de duració ( $\Delta\theta=60^\circ$ ) tot i que aquesta dada ve donada segons el motor temperatura i pressió principalment més que per el regim de voltes, doncs la turbulència generada en augmentar la velocitat angular fa que es redueixi la durada de combustió i quedi compensat en la velocitat de gir del cigonyal de manera força lineal i per això podem fixar el valor.

Degut aquesta demora de creació, creixement i extinció de la combustió existeix l'avanç d'encesa per aprofitar al màxim el moment de màxima pressió en aquesta fase; doncs idealment la combustió s'iniciaria en el PMS (punt mort superior del pistó) per a no generar encara més dificultats en la fase de compressió.

L'avanç d'encesa a de ser tal que en passar  $7^\circ$  després del PMS s'hagi completat en un 50% la combustió,  $\theta_{50\%comb.}=187^\circ$ . El paràmetre "m" s'explica amb posterioritat.

$$[25] \theta_{ic} = \theta_{50\% comb.} - \sqrt[m+1]{\left(\frac{\ln(2)}{a}\right)} \cdot \Delta\theta$$

Queda clar doncs que pel fet de tenir una duració la combustió se superposa amb la compressió (degut a l'avanç d'encesa) i se superposa amb l'expansió per l'aprofitament de la reacció termoquímica.

Per a la modelització del desenvolupament del front de flama de la combustió existeix el paràmetre lineal  $\Theta(\theta)$  que depèn de l'angle del cigonyal que descriu la fracció cremada de la combustió:

$$[26] \Theta(\theta) = \frac{\theta - \theta_{ic}}{\Delta\theta}$$

On "θ" és l'angle actual d'estudi, "θ<sub>ic</sub>" és l'angle en que s'inicia la combustió i "Δθ" la duració de la combustió en graus girats al cigonyal.

S'ha optat per usar la llei de Vibe, que descriu molt més acuradament com i quan es va cremant la mescla dins la cambra seguint una corba de comportament real que s'expressa de manera integrada: [27]  $x(\theta) = 1 - e^{-a \cdot \theta^{m+1}}$

On "e" és la constant d'Euler que descriu un comportament exponencial amb valor de 2.7182..., el paràmetre "a" és un indicador de la fracció màxima de calor que intervé en la combustió amb un valor comú de 6.908 que implica una  $x_{màxima}=0.999$  de mescla cremada on la unitat es el 100% amb zero increments; el paràmetre "m" és un indicador de com es crema la mescla doncs segons el seu valor la forma de la corba descrita canvia, els valors de m van de 1 a 7 essent u valor comú que mostra un espectre simètric m=2.

La temperatura total vindrà donada per la temperatura arrossegada del motor la pròpia de la fase superposada, compressió o bé expansió més la temperatura generada en la combustió:

$$[28] T_{total\ comb}(\theta) = T_{\theta} + \Delta T_{comb}(\theta)$$

La temperatura de combustió es extreta a partir de  $\Delta U = Q_{in} + Q_{desrpesa} + W$  on el treball  $W = P \cdot dV$  El diferencial de Volum es redueix a zero. Quedant la calor produïda pel combustible, la despesa per convecció i la entalpia interna del fluid

$$[29] \Delta T_{comb}(\theta) = \frac{\eta_{comb} \cdot x(\theta) \cdot m_{benzina} \cdot PCI_{benzina} \cdot \sum_{\theta_{i+1}}^{\theta_i} q_{despresa\ comb.}(\theta)}{m_{mescla} \cdot C_{v,mescla}}$$

La calor despesa s'extreu del flux de calor multiplicant pel temps que tarda a fer un grau el cigonyal ( $t_{1^\circ}$ ) per eliminar la unitat del temps

$$[30] \sum_{\theta_{i+1}}^{\theta_i} q_{despresa\ comb}(\theta) = \dot{q}(\theta) \cdot t_{1^\circ}$$

$$[31] \dot{q}(\theta) = h_{convecció}(\theta) \cdot A_w(\theta) \cdot (T_{total\ comb}(\theta) - T_w)$$

On  $T_w$  és la temperatura de la paret del cilindre i s'escull un valor de 200°C, el valor d'aquest parametre és molt poc influenciable en el resultat de l'equació.

L'àrea mullada  $A_w(\theta)$  per on el calor s'extreu és calcula de la següent manera:

$$[32] A_w(\theta) = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \pi \cdot D \cdot x(\theta) + (\pi \cdot D \cdot H_{cc} + \frac{\pi \cdot D^2}{4}) \quad \text{On } H_{cc} \text{ es el volum de la cambra de combustió en cas hipotètic de forma cilíndrica s'extreu de la següent manera:}$$

$$[33] H_{cc} = \frac{4 \cdot V_{cc}}{\pi \cdot D^2}$$

On  $h_c$  es la constant de convecció extreta per l'equació de woshcnni:

$$[34] h_{convecció}(\theta) = 0.035 \cdot D^{-0.2} \cdot P(\theta)_{comb}^{0.8} \cdot T_{total\ comb}^{-0.546} \cdot w(\theta)^{0.8}$$

La pressió de combustió s'extreu fàcilment aplicant la llei de gasos ideals:

$$[35] P(\theta)_{comb} = \frac{n_m \cdot R \cdot T_{total\ comb}}{V(\theta)}$$

La següent formula és per a la velocitat mitja dels gasos cremant. Amb  $C_1=2.28$   $C_2=3.24 \cdot 10^{-3}$ .

$$[36] w(\theta) = C_1 \cdot v_{mp} + C_2 \cdot \left( \frac{V_c \cdot T_r}{P_r \cdot V_r} \right) \cdot (P(\theta)_{comb} - P_m)$$

On [37]  $v_{mp} = 4 \cdot r_{cigonyal} \cdot n_{regim\ de\ gir}$  és la velocitat mitja del pistó  $V_c$  és el volum desplaçat, i  $T_r, P_r, i V_r$  són la temperatura pressió i velocitat, respectivament, de referencia, aquestes poden ser les de l'inici de combustió. Per últim  $P_m$  és la pressió arrossegada del motor.

Com es pot apreciar la complexitat matemàtica de la modelització de la combustió és important doncs per a la primera equació de la temperatura necessitem 9 subequacions en les quals es repeteix el valor a aïllar, això dificulta la resolució sobretot si no es treballa amb valors; la solució és resoldre per el mètode iteratiu.

El treball en aquesta zona o bé es contempla en la compressió o en l'expansió o en la duració de la combustió per mitja de: **[22.1]**  $W = \frac{1}{2} \cdot (P_1 + P_2) \cdot (V_1 + V_2)$

#### **4.6 Expansió Politròpica**

L'expansió politròpica és calcula de la mateixa manera que la fase de compressió amb la diferencia de l'exponent politròpic n que en aquest cas pren un valor de n=1.3 valor que repetim que varia en cada motor i està comprés entre 1 i la constant adiabàtica k.

L'expansió comença des del punt mort superior del pistó i acaba amb l'obertura de la vàlvula d'escapament, es a dir abans del PMI (punt mort inferior) degut a l'avançament d'obertura de la vàlvula.

El càlcul és igual que en la primera fase no obstant en aquesta existeix un punt de recalculació, i és al final de la combustió, on a partir de aleshores es prenen els valors del final d'aquesta i es prossegueix igual fins a la finalització de la fase.

El treball produït aquí serà positiu a diferencia de la compressió.

#### **4.7 Tancament del diagrama P-V**

El diagrama finalitza amb l'obertura de la vàlvula d'escapament en aquest punt la sobrepressió produïda per l'expansió elimina els gasos d'escapament generant una forta onada de pressió que s'igual a fins arribar a la pressió d'admissió per a començar de nou el cicle un cop feta la renovació de la càrrega de la nova mescla fresca.

Per a la caiguda de temperatura es genera la resta de l'última temperatura en l'últim grau de l'expansió i la Temperatura d'admissió i es reparteix en tants graus com contempli la fase. Normalment l'avançament de la vàlvula es du a terme entre 35 i 45 graus abans d'arribar al PMI. EL nostre AOE(avanç obertura escapament ) és de 40°. En aquesta fase no hi ha treball aprofitable.

$$\text{[38]} \Delta T_{\text{tancament}} = \frac{T_{\text{admissió}} - T_{\text{AOE}}}{\text{graus}_{\text{AOE}}} \quad \text{[39]} T_2 = T_1 + \Delta T_{\text{tancament}}$$

## **5. DADES, RESULTATS, I DIAGRAMES OBTINGUTS**

### **Per al motor de sèrie Suzuki GSR 600:**

<b><u>Fitxa tècnica</u></b>	<b><u>Suzuki GSR 600</u></b>	<b><u>Dades model numèric</u></b>
h, cursa	42.5mm	=
D, diàmetre	64mm	=
l, long.biela	0.123	=
R, rati compressió	1/12.5	=
Cilindrada total motora	599 cm <sup>3</sup>	=
V <sub>D</sub> Cilindrada unitària	149.75 cm <sup>3</sup>	=
Z, num.cilindres actius	4	=
Zc, num.cilindres compressors	0	=
Ne, Potència	98 cv a 12000rpm	98.44 cv a 12000 rpm
Me, Parell	64 Nm a 10800 rpm	57 Nm a 10800 rpm

### **Per al motor prototip BERDROD 600:**

<b><u>Fitxa tècnica</u></b>	<b><u>Motor BERDROD 600</u></b>	<b><u>Dades model numèric</u></b>
h, cursa	42.5mm	=
D, diàmetre	64mm	=
l, long.biela	0.123	=
R, rati compressió	1/12.5	=
Cilindrada total motora	299.5 cm <sup>3</sup>	=
V <sub>D</sub> Cilindrada unitària	149.75 cm <sup>3</sup>	=
Z, num.cilindres actius	2	=
Zc, num.cilindres compressors	2	=
Ne, Potència	x	29.06 cv a 5000 rpm, 98.44 a 12000 rpm.
Me, Parell	x	40.83 Nm a 5000rpm, 57 Nm a 12000 rpm
MAP (Manifold absolute pressure)	0.8 Bar	=

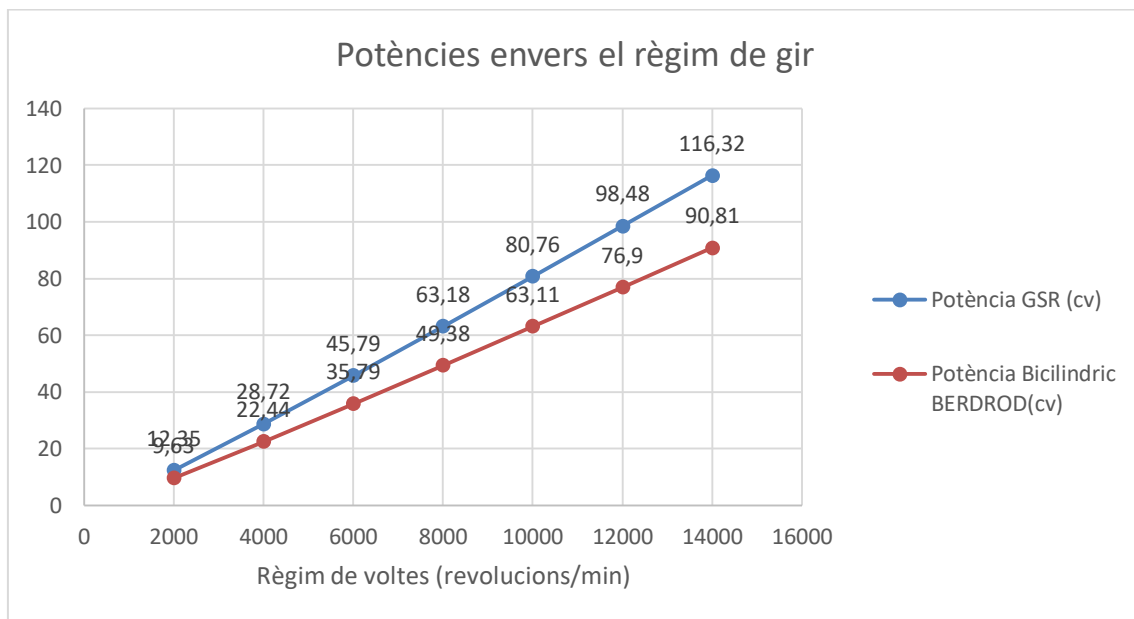
### **5.1 Comparació de potències i parells entre els dos models**

Comparació entre motor berdrod en fase 1 (bicilíndric sobrealimentat i motor de sèrie gsr 600 de Suzuki:

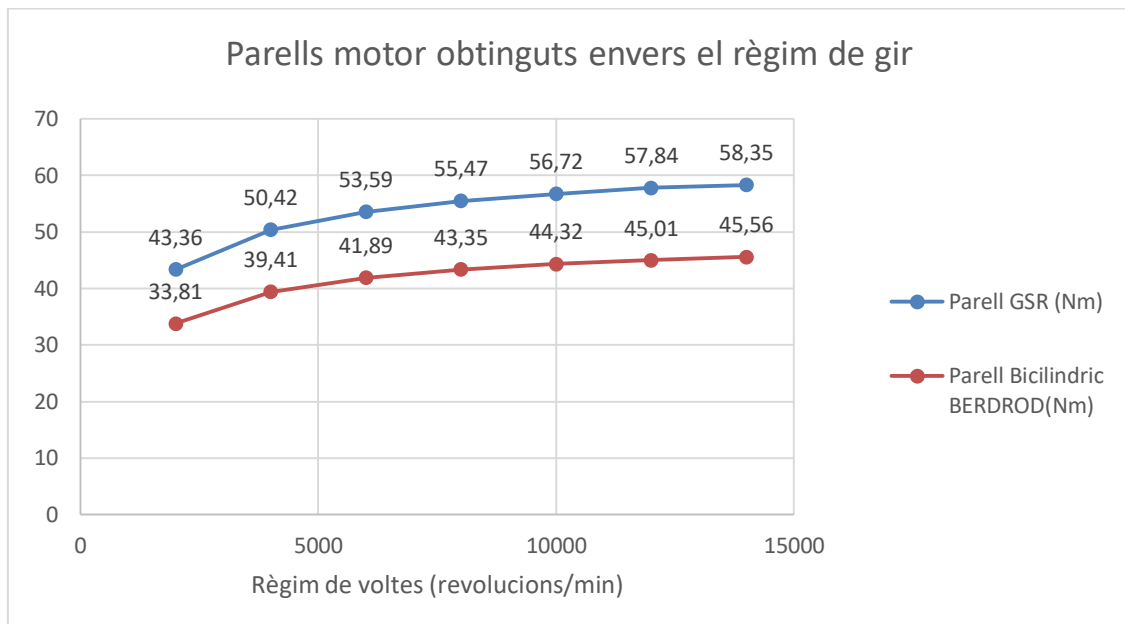
Es genera una primera taula i gràfica comparativa entre el motor de sèrie i el motor bicilíndric sobrealimentat és a dir el motor berdrod en la primera fase allargada fins al final.



<u>Règim de gir (Rpm)</u>	<u>GSR 600 de Suzuki, Pot. (Cv)</u>	<u>Bicilíndric sobrealimentat, Pot.(Cv)</u>
<b>14000</b>	116,32	90,81
<b>12000</b>	98,48	76,9
<b>10000</b>	80,76	63,11
<b>8000</b>	63,18	49,38
<b>6000</b>	45,79	35,79
<b>4000</b>	28,72	22,44
<b>2000</b>	12,35	9,63



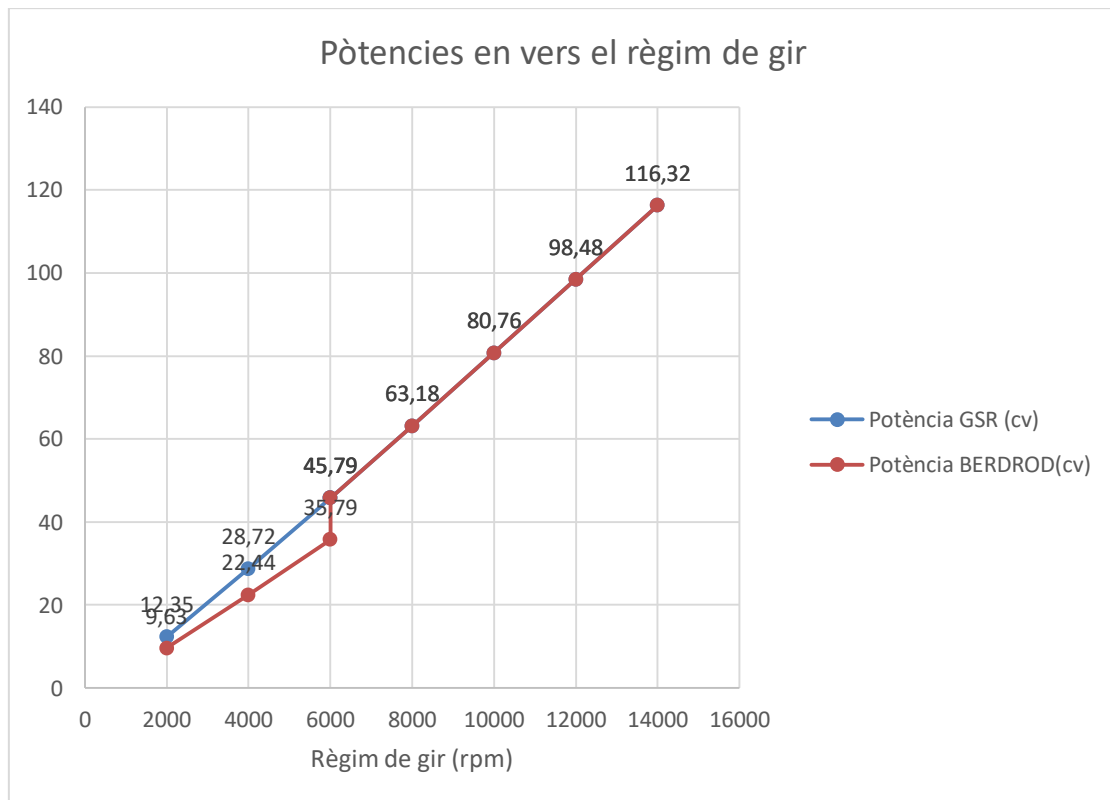
<u>Règim de gir (Rpm)</u>	<u>Suzuki GSR 600, Parell (Nm)</u>	<u>Bicilindric sobrealimentat, Parell (Nm)</u>
<b>14000</b>	58,35	45,56
<b>12000</b>	57,84	45,01
<b>10000</b>	56,72	44,32
<b>8000</b>	55,47	43,35
<b>6000</b>	53,59	41,89
<b>4000</b>	50,42	39,41
<b>2000</b>	43,36	33,81



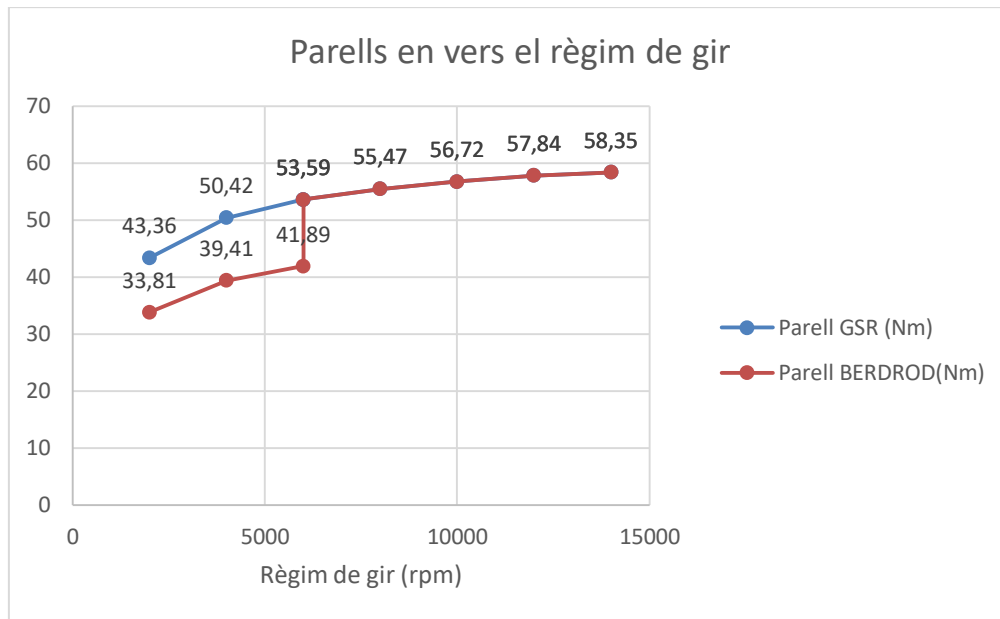
## 5.2 Comparació motor Berdrod en la seva totalitat i motor de sèrie gsr 600 de Suzuki

Es genera una segona taula i gràfica entre el motor de sèrie i el motor berdrod , ara aquest últim, amb el canvi de fases característic, s'observa que la segona meitat de la corba coincideix amb el motor de sèrie, doncs és el mateix.

<u>Règim de gir (Rpm)</u>	<u>GSR 600 de Suzuki, Pot. (Cv)</u>	<u>Motor Berdrod, Pot.(Cv)</u>
<b>14000</b>	116,32	116,32
<b>12000</b>	98,48	98,48
<b>10000</b>	80,76	80,76
<b>8000</b>	63,18	63,18
<b>6000</b>	45,79	45,79
<b>6000</b>	45,79	35,79
<b>4000</b>	28,72	22,44
<b>2000</b>	12,35	9,63



<u>Règim de gir (Rpm)</u>	<u>Suzuki GSR 600, Parell (Nm)</u>	<u>Berdrod, Parell (Nm)</u>
<b>14000</b>	58,35	58,35
<b>12000</b>	57,84	57,84
<b>10000</b>	56,72	56,72
<b>8000</b>	55,47	55,47
<b>6000</b>	53,59	53,59
<b>6000</b>	53,59	41,89
<b>4000</b>	50,42	39,41
<b>2000</b>	43,36	33,81



Es pot observar tant en el parell com en la potència que el motor de sèrie registra números més alts doncs disposa dels 4 cilindres envers els dos cilindres dels motor berdrod de la primera fase.

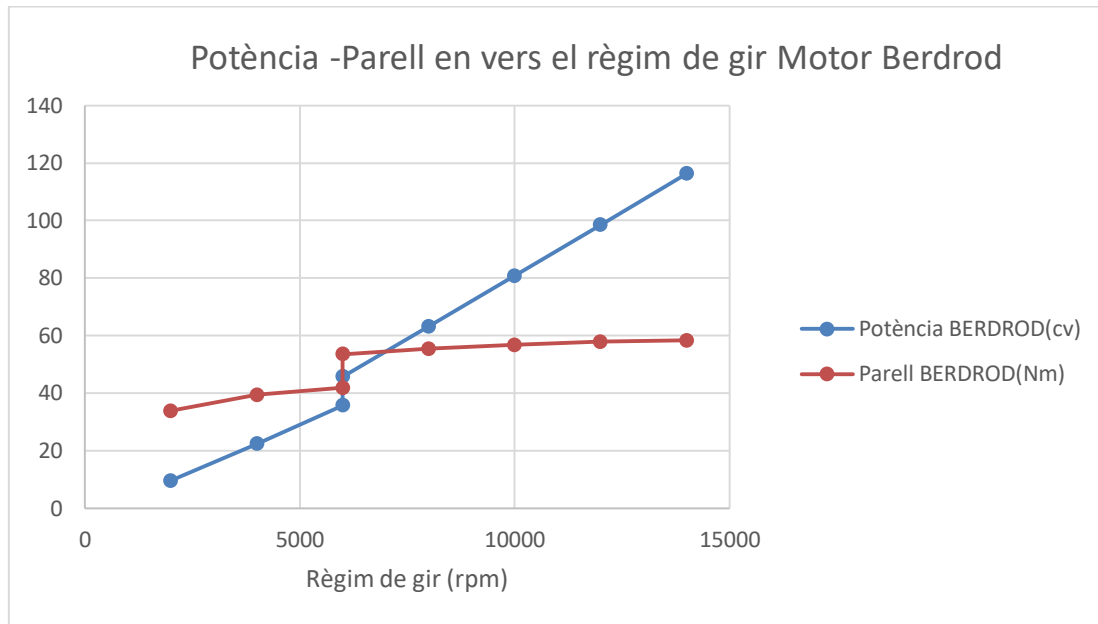
No obstant és interessant observar el Parell per litre i la Potència per litre que contrasta motors de diferents cilindrada i expressa la potència i el parell per un motor amb una cilindrada de 1000cm<sup>3</sup> o 1 litre.

	<b>Suzuki GSR 600</b> (12000 rpm)	<b>Motor Berdrod</b> (5000 rpm,fase bicilindrica amb MAP 0.8)
Potència per litre (cv/L)	164.34	97.04
Parell per litre (Nm/L)	98.16	136.32

Tal com s'observa, el resultat obtingut és el buscat, doncs el motor Berdord desenvolupa més parell que potència i viceversa amb el motor de sèrie. En els resultats mostrats les dades son preses a diferent regim de gir per assimilar la potència màxima, tot i així si és genera amb les mateixes condicions és multiplica l'efecte, per exemple si el motor Berdrod gires a 12000 rpm com ho fa el motor de sèrie surt un valor de  $N_{litre} = 256,77$  cv/L i  $M_{litre} = 150,28$  Nm/L.

Posicionant correctament la primera i segona fase aconseguim un motor molt Polivalent i atractiu.

### **5.3 Motor Berdrod, Corba potència parell en vers el règim de gir del motor**



Tal i com és pot apreciar es confirmen les expectatives de comportament predites en el punt **“3.1 Previsions de comportament i eficàcia”** , es mostra el característic esglaonament del canvi de fase que hem decidit col·locar a 6000 rpm, tot i que és podrà modificar segons la demanda de potencia o parell i condicions exteriors segons el reglatge.

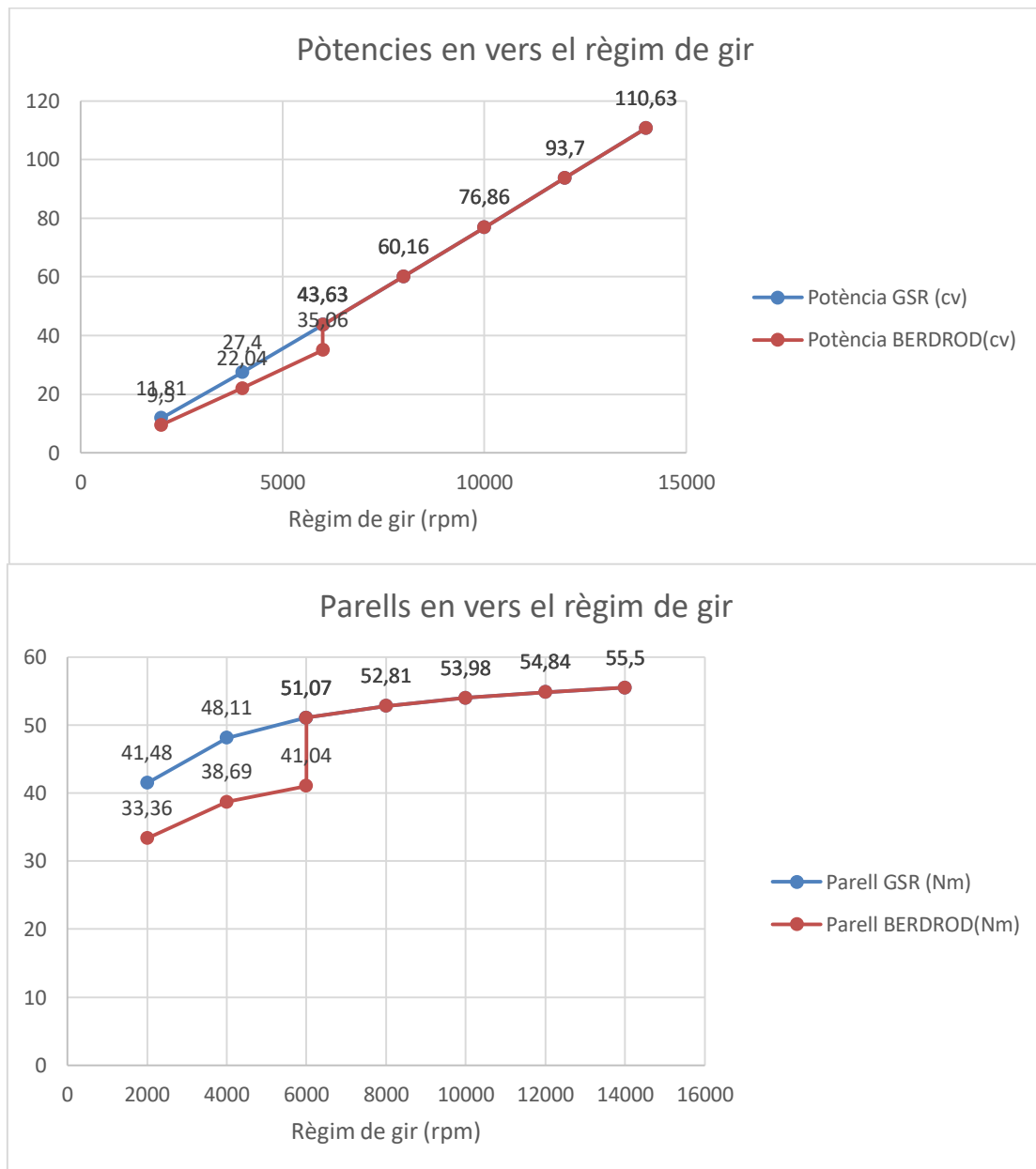
#### **5.3.1 Solució per a suavitzar el canvi de fase**

Per evitar o reduir l'esglaonament que genera desconcert i pot propiciar situacions perilloses es recorre a la reducció del rati de compressió i augment del MAP(pressió absoluta en el maneguet d'admissió) per potenciar la primera fase sobrecompressada i endolcir la segona fase atmosfèrica del motor.

Les diferències en el salt de fases per a una relació de compressió de 12.5 a 1 i un MAP de 0.8 bar és de  $\Delta N=10$  cv en les potències i  $\Delta M=11.7$  Nm en els parells desenvolupats.

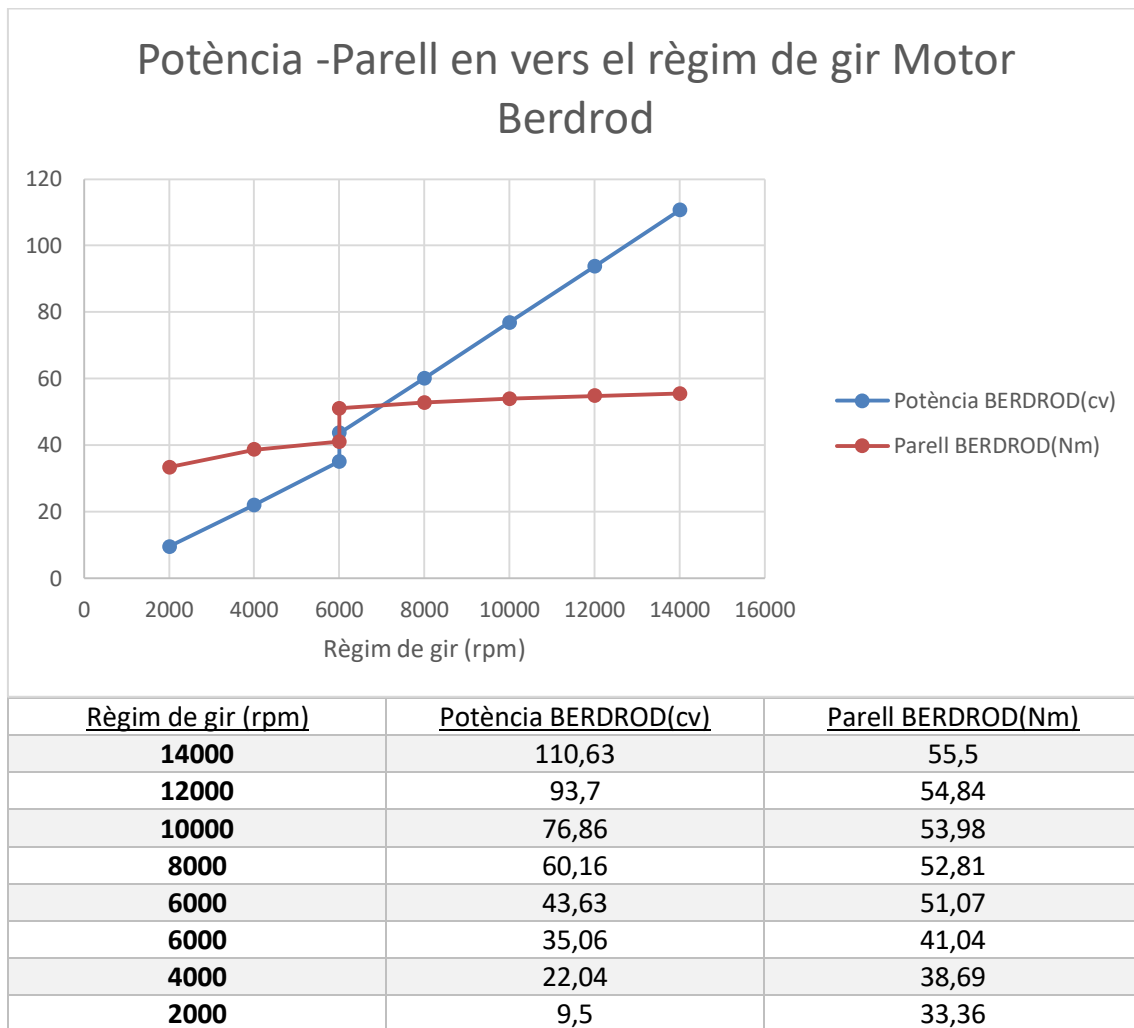
Si modifiquem la relació de compressió rebaixant la possibilitat de autodedonacions podem incrementar la pressió del MAP, amb una relació de compressió de 11.5 a 1 i un MAP de 1.1 bar l'esglaonament es suavitza a  $\Delta N=8.57$  cv en les potències i  $\Delta M=10.3$  Nm en els parells desenvolupats.

Les gràfiques queden de la següent manera:



A simple vista no es pot deduir però si ens hi fixem veurem que sobre els punts de salt hi ha les dades de la gràfica que minoren el comportament agressiu del salt comentat amb anterioritat.

La corba característica del motor Berdrod quedaria així:





## **6. CONDICIONS D'ÚS I FUNCIONS LÒGIQUES**

A més a més escrivint una sèrie de funcions lògiques podem determinar l'activació en el moment adequat en que el conductor no sigui sorprès per l'acció assegurant la seguretat, que és afer primordial.

- Activació de fase 1 a 2 només en plena carrega del motor. D'aquesta manera assegurem que a la meitat de una corba el pilotatge és manté igual doncs no es fins a la sortida que existeix una demanda total de càrrega.
- Segons el mapejat seleccionat la centraleta deixa en estat fixat una fase o altra.
- Segons la velocitat d'engranament de la caixa de canvis que es dugui és salta a la fase amb motor de sèrie, tots els cilindres treballant o viceversa amb la primera fase.

## **7. COMBUSTIBLES MÉS ADEQUATS PEL MODEL DE MOTOR BERDROD**

Cal dir que en vista de la realitat econòmica i funcional en el mercat d'avui en dia (sigui quina sigui la seva finalitat d'us en turismes utilitaris, competició, o en industria..), estem tractant amb combustibles fòssils i som conscients de quan allunyat de la netedat dels motors elèctrics queda, però amb l'esperança que les noves implantacions de tecnologia prenguin una millora important en els motors de combustió interna.

### **7.1 Característiques ideals**

El factor determinant més important aquí es l'octanatge, o capacitat del combustible a ser comprimit a certa temperatura sense que aquest autodeioni. Per a tenir una idea el dièsel es col·loca en un rang de 15-25 octans, i la benzina està sobre l'ordre de 90-110 octans segons els país on es vengui i quan refinada estigui. Queda clar que essent el nostre motor Berdrod un motor d'encesa per guspira descartem els combustibles de baix octanatge, comunment més pessats i contaminants; busquem un combustible que compleixi els requisits següents:

- Alta resistència a la compressió per evitar l'autoncesa, fenòmens com el "knock" o el "picat"; implica Alt octanatge.
- Combustible lleuger, poc contaminant.
- Combustible segur, de baixa nocivitat/toxicitat.
- De producció sostenible.
- Amb el màxim poder calorífic possible.
- Facil d'emmagatzemar.
- Preferència en estat líquid.
- De reacció endotèrmica mitjana en evaporar-se.
- Viscositat baixa- mitja. Implica la fàcil homogeneïtzació.
- Dosat estequiomètric el qual no necessiti combustible en excès.
- Preu baix.

En vista que el motor de sèrie treballa amb benzina 95 octans podem tenir una idea que ens condueixi a un combustible semblant o de major qualitat.

Els candidats estudiats són:

## **7.2 Hidrogen**

És el més lleuger de tots inclòs en estat líquid, però s'evapora un 30% més que la benzina amb una temperatura d'ebullició de 20 graus Kelvin.

Amb el major poder calorífic de tots els combustibles 114 MJ/Kg en estat líquid però en estat gasos es redueix dràsticament el valor.

Molt insegur degut al alt rang d'inflamabilitat.

Difusió per fuita molt ràpida.

La seva combustió és tant ràpida en el front de flama que produeix picat de tant violent que és.

L'octanatge és semblant al de la benzina.

## **7.3 Etanol**

L'alcohol etílic o etanol és una alcohol, de fórmula  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ . És un líquid incolor i inflamable amb un punt d'ebullició de 78 °C.

Existeixen certs problemes amb la capacitat d'absorció de la humitat i aigua d'aques combustible. La temperatura de congelació és baixa però amb l'absorció torna a incrementar aquest valor.

Té molt més octanatge que la benzina comú, i a més, tot i que el contingut de l'aigua en l'etanol sigui indesitjat l'adició d'aquesta disminueix la temperatura en el cilindre i per efecte doble augmenta la compressibilitat d'aquest. Per contra l'etanol amb l'acompanyament d'aigua acostuma a ajudar la creació de la corrosió/oxidació que augmenta amb la temperatura.

Per a obtenir etanol lliure d'aigua es poden utilitzar dessecants com el magnesi que reacciona amb l'aigua formant hidrogen i òxid de magnesi, encara que és preferible aplicar la destil·lació azeotròpica en una barreja amb benzè o ciclohexà. D'aquestes barreges es destil·la a temperatures més baixes l'azeotrop, format pel dissolvent auxiliar amb l'aigua, mentre que l'etanol es queda retingut.

Conductivitat elèctrica més alta que la benzina, implica més corrosió però menys problemes de càrrega estàtica, el qual el fa més segur.

La fermentació del sucre en etanol fou una de les primeres reaccions orgàniques emprades per la humanitat. Per tant contempla una producció sostenible en el sentit que la planta que produeixi els sucres haurà retirat certa quantitat de carboni de l'atmosfera que s'iguali amb el cremat, doncs es genera 71.38g de  $\text{CO}_2$  per Megajoule produïts amb etanol.

Els efectes intoxicants del consum d'etanol han estat coneguts des de fa mil·lennis per la humanitat doncs s'utilitza en la seva versió per al consum de begudes alcohòliques o en higiene sanitària, el qual el fa una substància segura.

També es produeix etanol per un ús industrial a partir de subproductes de la refinació del petroli com és L'E85 aquest amb un 85 % de etanol i el restant amb benzina o l'E10 amb un 10% d'etanol i el restant de benzina. Són utilitzats en barreja perquè a causa de la forta reacció endotèrmica d'aquest alcohol en evaporar-se necessita absorbir molta energia (3 cops més que la benzina) i dificulta la combustió en fred i per tant l'arrencada del motor, fet que es soluciona afegint benzina.

En comparació amb la benzina l'ús d'aquest alcohol en l'automoció comporta un consum més elevat de combustible amb etanol que amb benzina, doncs els poders calorífics són: 27MJ/Kg d'etanol en vers 43MJ/Kg de Benzina. No obstant la potència reduïda a casa d'aquest valor baix de poder calorífic pot ser solucionat augmentant el rati de compressió i en cas d'un motor sobrealimentat augmentar la pressió d'admissió ja que ens ho permet la seva resistència al picat (knock límit molt alt), parlem de 105 octans amb la mescla E85.

Aquests conjunt de trets el fan molt atractiu per a ser escollit per al nostre motor d'alt rati de compressió amb la capacitat de una forta sobrealimentació. No obstant existeixen certes conductes corrosives amb aquest combustible que el deixen en una posició secundària.

#### **7.4 Metanol**

El metanol, també conegut com a alcohol metílic o alcohol de fusta, és un compost químic amb la fórmula química  $\text{CH}_3\text{OH}$ . És l'alcohol més simple i és un líquid lleuger, volàtil, incolor, inflamable, verinós i altament tòxic inhalat o al tacte amb una olor distintiva.

El metanol es produeix a la natura a causa del metabolisme de moltes varietats de bacteris anaeròbics. Com a resultat d'aquest, hi ha una petita fracció de vapor de metanol a l'atmosfera. En el transcurs d'alguns dies, el metanol atmosfèric s'oxida en diòxid de carboni i aigua a causa de l'oxigen i amb l'ajuda de la llum solar.

Es pot extreure de la piròlisi de matèries orgàniques i del metà (component principal del gas natural). El gas natural i vapor d'aigua es reformen en un forn per produir hidrogen i monòxid de carboni; llavors aquests dos últims gasos reaccionen en presència d'un catalitzador i sota pressió. El procés de reforma és endotèrmic i la síntesi és exotèrmica.

La producció és només viable a gran escala amb un procés de producció molt perillós i calent amb risc d'incendi per la piròlisi tot i que la producció és més barata que la de l'etanol.

Es pot utilitzar amb benzina o pur, s'utilitza en motors de competició i a la xina. Avui dia s'utilitza una mescla de 90% Metanol 10% Benzina.

### **7.5 Gas natural (GNC, gas natural comprimit o GNL, gas natural líquat) (metà)**

És una mescla de gasos, no tòxica, incolor i en principi inodor (s'odoritza com a mesura de seguretat, per a detectar escapaments), en el qual el seu principal component és el metà ( $\text{CH}_4$ ) en un 90%, per bé que conté també altres hidrocarburs com l'età ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), el propà ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), el butà ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , component principal de les bombones de gas per a cuines) o el pentà ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) en molta menor proporció.

Genera una quantitat baixa de residus en quant al  $\text{CO}_2$  54.97g per mega-Joule d'energia aconseguit.

Problemes amb la elevada càrrega electrostàtica.

Existeix la possibilitat de fuga degut a la baixa viscositat en estat gasos.

Forma hidrats que acostumen a obstruir vies de pas fi pensades per al estat gasos.

El poder calorífic és de 30 MJ/Kg.

La mescla estequiomètrica es de 17.2 parts d'aire per 1 de combustible.

L'ordre d'octanatge pot arribar 120 octants. Aquest és un valor estimat doncs les mesures de l'escala estan normalitzades per a combustibles líquids.

El gas natural es comprimeix entre 15 i 30 MPa. Amb aquests valors, es necessita entre 5 i 3 vegades més de volum que en la gasolina per igualar la seva energia continguda. Aquest és un punt negatiu.

El GNL (líquat) és millor en termes de densitat d'energia emmagatzemada. El GNL és un combustible net, si es parla de impureses ja que han estat eliminades durant el processos de líquació; els hidrocarburs de cadena més llarga com el propà i butà també és desitjable que siguin eliminats per tenir un punt de solidificació més alt.

El principal problema és la conservació en un dipòsit doncs és necessària una vàlvula de pressió d'àlivi ja que incrementa fàcilment la seva energia degut a la vaporització per calor que es produeix al tanc que a més ha d'estar aïllat tèrmicament doncs el gas líquat és conserva a baixes temperatures, la qual cosa dificulta l'ús en vehicles comuns i s'empra el gas comprimit tot i l'augment de volum que comporta en 'espai del dipòsit d'alimentació del vehicle.

El gas natural comprimit o líquat preferiblement, doncs tot i tenir un PCI baix és el més compressible de tots tret que fa atractiu per al nostre motor Berdord doncs l'esglaonament del canvi de fase és veuria reduït podent augmentar dràsticament la pressió d'admissió i conseqüentment la potencia i parell, i la fase atmosfèrica esdevindria menys agressiva. Per contra el gran volum o acondicionament dels dipòsits d'emmagatzematge no fan viable l'ús d'aquest combustible.

Una versió millorada son els gasos líquats del petroli exposats a continuació

## **7.6 GLP, gasos líquats del petroli (Propà + Butà)**

Un gas líquat del petroli o GLP és un gas dissolt al petroli que podem obtenir evaporant el petroli cru i condensant aquests gasos. S'obtenen principalment a les torres de destil·lació de les refineries de petroli, o també per mitjà del craqueig d'altres substàncies (hidrocarburs més pesants) obtinguts igualment a la destil·lació. Els més habituals són el propà i el butà, que s'usen com a combustibles fòssils.

A pressió atmosfèrica seu punt d'ebullició és de  $-17^{\circ}\text{C}$ . S'emmagatzemen i transporten en forma líquida (d'aquí el nom) encara que van sempre acompanyats d'una bossa o càmera de fase gasosa. L'elevat índex d'octà i el seu poder calorífic, superior al dels combustibles líquids, juntament amb el fet que amb pressions entre 5 i 15 bars són líquids, fa que la seva utilització com a substitut dels combustibles líquids en vehicles sigui viable.

Els gasos líquats del petroli o GLP són una barreja d'hidrocarburs lleugers obtinguts en el procés de refinament del petroli, compostos principalment per butà i propà en proporcions variables, que solen ser de l'ordre del 60% de butà i un 40% de propà.

<b>Combustible</b>	<b>PCI MJ/Kg</b>
GLP	45,89
Propà	46,20
Butà	44,78

Com podem observar els elements tenen un poder calorífic semblant.

- **Propà:** El propà en condicions normals és un gas inodor i incolor. És un hidrocarbur alifàtic de fórmula química  $\text{C}_3\text{H}_8$ . El nombre d'octans volta per 104 i 112.
- **Butà:** El butà és un hidrocarbur saturat, parafínic o alifàtic, inflamable, gasós que es liqua a pressió atmosfèrica a  $-0,5$  graus Celsius. La fórmula química del qual és  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ . El butà presenta dos isòmers l'n-butà (nº octans, 94) i l'isobutà (nº octans, 102) o metil-propà.

El GLP obté un dosat estequiomètric de 15,63 parts de comburent per una de combustible.

L'índex d'octanatge GLP ronda sobre els 103 octans.

Una de les seves avantatges en l'aspecte ambiental és la baixa tendència a formar ozó troposfèric (pràcticament la meitat que la gasolina) i gairebé no mostra emissions de polí aromàtics i aldehyds.

La utilització de GLP no genera emissions de  $\text{SO}_2$  (diòxid de sofre) culpable juntament amb els  $\text{NO}_x$  de la pluja àcida.

En general, les emissions emeses ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$ , partícules i  $\text{CO}_2$ ) es veuen disminuïdes quan s'empria GLP.

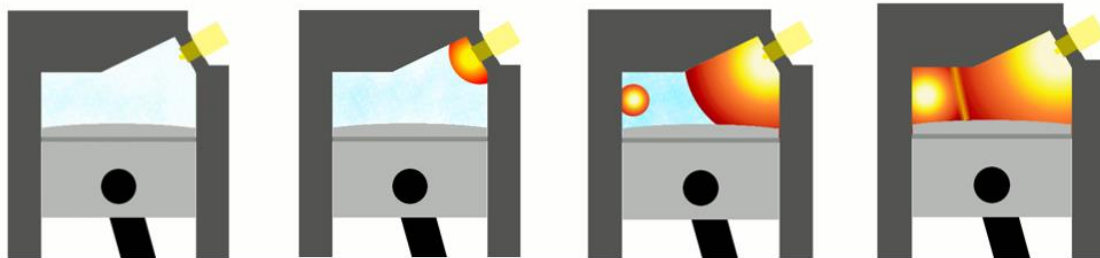
### **7.7 Elecció final**

Finalment és decideix emprar en cas d'alternativa els **Gasos Liquats del Petroli (GLP)** per la seva actual viabilitat ja implantada en vehicles i les seves característiques símls a la benzina millorades en l'aspecte mediambiental i la seva major compressibilitat permet suavitzar més l'esglaó de la corba potencia parell revolucions del motor Berdrod augmentant la pressió d'admissió sense gran perill. Aquesta opció precisaria d'injector directes a cambra preferiblement.

La segona opció seria la mescla E85 d'etanol per la bona producció sostenible i no ser aquest un combustible fòssil. L'únic que aquest es veu reduït en el PCI que afectaria finalment a la potencia i parell obtinguts.

### **8. PICAT O KNOCK**

La predetonació és un fenomen no desitjat que es produeix de manera espontània en el motor de combustió interna alternatiu, especialment de Cicle Otto, en què part de la barreja aire/combustible s'inflama de manera espontània molt abans que el pistó arribi al punt mort superior, abans que el front de flama de combustió provocada per la bugia arribi a tot l'espai de la cambra de combustió. Contràriament, aquesta ignició del combustible es buscada en els motors d'encesa per compressió, on el combustible es va cremant a mesura que surt del injector directe a cambra on es crema més gradualment que en una explosió sobtada o detonació, cal diferenciar-ho ja que és la causa problemàtica amb aquest fet, que deteriora i acurta la vida útil de les peces del motor, ja que no es el mateix aplicar una força constant, així com gradualment, que a cops, repetidament o d'altres formes que afecten principalment a la fatiga del material.



Il·lustració 86 En aquesta imatge es pot veure l'evolució d'esquerra a dreta d'una ignició provocada per una guspira on en una altra part de la cambra provocada per la sobrepressió d'aquesta primera, es genera una explosió o picat.  
[https://ca.wikipedia.org/wiki/Detonaci%C3%B3\\_\(motor\\_alternatiu\)](https://ca.wikipedia.org/wiki/Detonaci%C3%B3_(motor_alternatiu))

Aquesta auto ignició succeeix quan la calor alliberada per la reacció, en una zona de la cambra és més gran que la calor perduda pels voltants aquesta comença a augmentar de temperatura fins que es produeix el fenomen.

La detonació o "picat" es produeix en situacions en què es compleixin una o diverses de les situacions següents a la vegada:

- Sota Càrrega de motor elevada.
- Encesa del motor massa avançat, amb càrrega elevada.
- Relació de compressió massa elevada.
- Barreja aire/combustible pobre, provoca un escalfament superior.
- Mala distribució de la mescla de carburant i comburent dins la cambra que provoqui punts amb grans diferències de temperatura.
- Punts calents o incandescent com arestes, pol·lucions o residus.
- Temperatura elevada.
- Rodar per sobre l'octanatge del combustible.

Per a la correcció del fenomen podem:

- Utilitzar un octanatge major en el combustible
- En els motors antics amb possibilitat d'ajust de l'avanç, retardar uns pocs graus el distribuïdor.
- En els motors amb Encesa del motor electrònic, s'instal·la un sensor de picat, que endarrerix momentàniament l'avanç de l'encesa fins que desaparegui el fenomen.
- Si es causa de una mala homogeneïtat de la mescla generar turbulències.
- Si es causa de punts calents arrodonir al màxim els vèrtex i protuberàncies de la cambra

Així doncs com més espontàniament cremi la mescla i per tant amb més velocitat més s'apropa a l'explosió sobtada que no desitgem. Quan diem que porta velocitat ens referim al front de flama que avança deixant la mescla cremada enrere i tenint mescla fresca per davant. Tot i que la combustió d'un MCIA (Motor de combustió interna alternatiu) sigui en termes turbulents estudiar el comportament de la flama en fase laminar ens ajuda a comprendre alguns conceptes.

Els paràmetres dels quals depèn la velocitat de la flama laminar són:

- Pressió: En augmentar la pressió pot augmentar una mica la velocitat de combustió laminar. Això es deu al fet que la influència de la pressió sobre la velocitat de les reaccions químiques és relativament petita, per molt que els processos de difusió i transmissió de calor s'accentuen a l'eleva-la pressió també degut a la relació amb la temperatura.
- Temperatura: L'augment de la temperatura inicial de la mescla incrementa la velocitat de propagació de la flama, com a conseqüència de l'augment de la velocitat de reacció i del coeficient de difusivitat.
- Càrrega: No es el mateix anar amb l'admissió estrangulada (no fent ús de les màximes prestacions de motor) que anar a plena càrrega. En motors d'ignició per guspira augmenta el picat (explosió, canvi de pressions gairebé instantani amb gran diferència de temperatura entre el punt i els voltants) quan augmenta la temperatura de combustió, degut al reduït període de retard o temps entre la fase d'encesa i la fase de combustió.

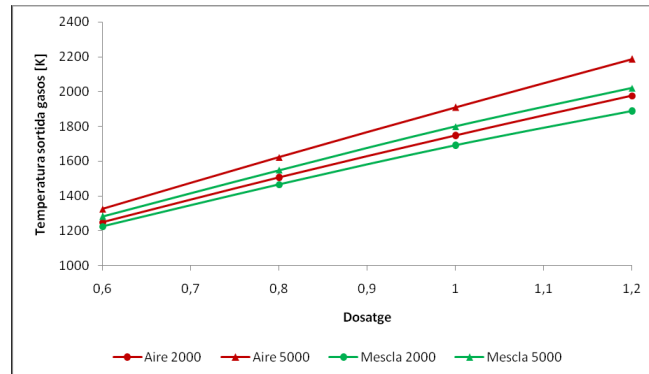
**↑ Càrrega => ↑ Pressió ↑ Temperatura => ↓ Temps cremat o ignició**



- Dosat: Els dosats lleugerament rics, propers al estequiomètric, són els que produeixen majors temperatures i, per tant, majors velocitats de flama. Quan la barreja es fa molt pobre o molt rica, la velocitat laminar decreix limitadament, té un mínim a partir del qual la flama s'extingeix. Els valors límits del dosat, per als quals la flama no progressa, es coneixen amb el nom de límits d'inflamabilitat, és el que els mecànics en diuen d'un motor que està sota aquests dos dosats límits o més enllà d'aquests i s'usa l'expressió de "negar-se" o "ofegar-se" degut a que falta aire o bé la necessitat de més combustible per equilibrar el dosat.

**Dosat > 1      =>      ↑ Temperatura**

Recordem que un dosat relatiu  $\Phi=1$  és l'estequiomètric,  $\Phi>1$  és més ric i per tant amb excés de combustible, i  $\Phi<1$  és un dosat pobre amb excés d'aire. Vegem la següent taula on és mostra aquesta relació:



**Il·lustració 87** Diagrama que mostra el dosatge relatiu en vers la temperatura amb diferents règims de gir del motor, a 2000 rpm i a 5000rpm. Imatge extreta del TFG de "Modelització de la fase tancada en motors alternatius de combustió interna de cicle otto mitjançant Matlab" de Miquel Ardanuy Agulló.

- Combustible: Aquest factor té poca influència sobre la velocitat de combustió laminar, ja que els hidrocarburs usualment emprats en els combustibles tenen semblants temperatures de combustió. A excepció de l'hidrogen, que quintuplica la seva velocitat de combustió laminar.
- Humitat i gasos residuals: La seva presència disminueix la velocitat de propagació de la flama, causa que provoquen una disminució en la temperatura de combustió.

### **8.1 Càlcul de previsió de detonació.**

Per a veure si un motor entra en fase de picat s'utilitza el paràmetre "r" que és el temps de retard, temps que la mescla ha de estar sota unes condicions de pressió i temperatura que passat aquest període faria que la aquesta explotés.

La combustió detonant es produeix perquè una part del combustible que es troba a la cambra de combustió supera el seu temps de retard i es produeix el autoencesca.

L'equació emprada i la més triada en aquesta especialització és la de Douaud i Eyzat:

$$[40] \quad r = 17.68 * \left(\frac{NO}{100}\right)^{3.402} * p^{-1.7} * e^{\left(\frac{3800}{T}\right)}$$

On “r” és el temps de retard en milisegons, “p” la pressió absoluta en atmosferes, “T” es la temperatura en kelvin, i “NO” és el nombre d’octans del combustible.

A partir del càlcul infinitesimal que prèviament hem fet de la combustió és comparen els resultats de quan dura la combustió i quin és el retard i saber així si existeix el fenomen d’autodetonació.

Totes les proves que hem efectuat estan dintre dels límits de seguretat lluny del picat.

## **9. MATERIALS, RECOBRIMENTS TRACTAMENTS I FABRICACIÓ**

### **9.1 Culata (bloc)**

La culata es l’element bloc on van subjectades tots els elements de la distribució i és la peça que encapçala el motor i tapa els cilindres per la part superior formant un espai denominat com a cambra de combustió. Sobre ella s’assenten les vàlvules, tenint orificis i conductes dedicats a la respiració del motor. És un element que ha de suportar certes sol·licitacions mecàniques entre els arbres de lleves i taqués/vàlvules/Balancins, i les tensions produïdes per la cadena o corretja de distribució; ha de suportar les pressions de bombeig en els seus conductes que portin lubricants o bé refrigerant en cas que sigui de refrigeració líquida apart d’oferir estabilitat enfront el possible atac corrosiu dels líquids. El punt més important, ha de suportar les fortes pressions de la combustió dels cilindres i la temperatura a la que és veu sol·licitada. Pel fet de tenir tants racons i conductes s’opta per generar a partir de sorra motlles per fondre i colar el material, d’altra manera és fa impossible o molt car generar els espais interiors per arrencament de material.



Il·lustració 88 Imatge d’una culata vista per la part de les cambres de combustió amb vàlvules de seient muntades  
<https://www.rodes.com/mecanica/mantenimiento-de-la-culata-motor/>

Els materials que s’utilitzen són el ferro colat o en el àmbit de vehicles comuns aliatge d’alumini.

L’alumini pur necessita ser aliat degut a les seves baixes capacitat de resistència mecànica. Hi ha diverses maneres de produir-ho, per aliatge, aliatge més tractament tèrmic, i deformació en fred, aquesta ultima no valida. Mitjançant aliatges d’altres elements es tracta de formar una diferencia de mida per deformar l’estructura comú de l’alumini CCC, també es generen petits precipitats del material aliat que frenen i impedeixen que es generin dislocacions al alumini.

Els aliatges més comuns són amb coure que a partir de un tractament tèrmic i una posterior maduració es generen els anteriors precipitats anomenats, s’ha de seleccionar molt bé el procés doncs la temperatura de maduració que fa que surtin a la llum és una temperatura propera a la que és pot assolir en condicions de treball del motor i un excés

de maduració genera grans acumulacions de precipitats que inhabilita el procés d'aliatge.

Les varietats Al-Si-Mg són idònies per a l'ús de fabricació per fosa de la culata. El magnesi aporta resistència amb un tractament tèrmic i el Silici aporta fluïdesa/colabilitat.

Les designacions comuns per aquest aliatge són:

Grupo	Designación		Estado	Moldeado en arena				Moldeado en coquilla			
	Númerica	Simbólica		Rm, MPa	Rp0,2, MPa	A, %	HB	Rm, MPa	Rp0,2, MPa	A, %	HB
AlCu	EN AC-21000	EN AC AlCu4MgTi	T4	300	200	5	90	320	200	8	95
	EN AC-21100	EN AC AlCu4Ti	T6	300	200	3	95	330	220	7	95
AlSiMg	EN AC-41000	EN AC AlSi2MgTi	F	140	70	3	50	170	70	5	50
			T6	240	180	3	85	260	180	5	85
	EN AC-42000	EN AC AlSi7Mg	F	140	80	2	50	170	90	2,5	55
			T6	220	180	1	75	260	220	1	90
	EN AC-42100	EN AC AlSi7Mg0,3	T6	230	190	2	75	290	210	4	90
	EN AC-42200	EN AC AlSi7Mg0,6	T6	250	210	1	85	320	240	3	100
	EN AC-43000	EN AC AlSi10Mg(a)	F	150	80	2	50	180	90	2,5	55
			T6	220	180	1	75	260	220	1	90

**Il·lustració 89** Imatge extreta dels apunts de materials estructurals, assignatura impartida a la universitat politècnica de Catalunya a Vilanova i la Geltrú.

Les designacions es llegeixen EN(European Norm), AC (Aluminum cast) per ús de moldeig amb alumini silici la primera xifra és un 4 les altres xifres són de subaliatges o la designació específica única d'aquest, T6 (la columna de la taula mostrada "Estado") indica el nivell de maduració o bonificació del tractament que ha rebut. Existeixen adicions de lletres que indiquen per a que són destinats els aliatges, Segons la fosa sigui amb sorra, a pressió injectada, etc.

Segons les sol·licitacions mecàniques triarem una o altre mescla de components.

## 9.2 Arbre de lleves

L'arbre de lleves com el seu nom indica és un eix amb lleves o protuberàncies excèntriques amb la finalitat de transformar un moviment rotatiu amb lineal mitjançant un mecanisme de lleva on el radi exterior de la lleva llisca sobre un element el moviment del qual està restringit a moviment rectilini o de translació com venen a ser les vàlvules que llisquen dins les guies, taqués o bé balancins tot i que aquest últims tenen un moviment rotatiu oscil·latori alternatiu que acaba copiant el moviment a la vàlvula, normalment els elements anomenats munten una roda boja per a minimitzar el fregament. La diferència de radis de la lleva o la excentricitat provoca la translació.



**Il·lustració 90** Imatge d'uns arbres de lleves. Observis l'acabat superficial brillant de la lleva contrastant amb l'acabat de una part no funcional (de color fosc), aquesta última molt més basta i rugosa. <https://www.levascrespo.com/arboles-de-levas/levas-nuevas-potenciadas/vw1/16v-dohc/arbol-de-levas-de-vw-2-0l-16v-dohc-potenciadas/>

L'arbre de lleves no deixa de ser un programador sincronitzat cíclic mecànic de la distribució, doncs segons el posicionament de les lleves i la forma d'aquestes és decideix l'entrada i la sortida de gasos.

És un element sol·licitat a torsió i flexió ja que ha de suportar les acceleracions i desceleracions angulars del motor en contra les molles de tancament de les vàlvules que frenen aquest constantment. Acostuma a produir-se mitjançant la forja amb un posterior rectificat a les zones on hi ha encaixos amb altres peces com pinyons de distribució rodaments i coixinets, juntes i retenidors i les pròpies lleves que han de tenir un acabat amb molt poca rugositat per a reduir al màxim el fregament a part de tenir una bona resistència al desgast i ha de mantenir uns estàndards de resistència a la corrosió degut a l'alta temperatura i al contacte amb l'oli que no ha de suposar un pas un problema, tot al contrari el lubricant crea una capa protectora evolvent.

El material usat és un acer al carboni (el grau de carboni ve determinat segons la resistència i el procés de fabricació emmotllament en conquilla o forjat ) amb aliatges de silici, crom, níquel, coure, per aconseguir gran resistència mecànica i tèrmica. Si és volgués mantenir un nucli més flexible capaç d'absorbir vibracions i carregues i reforçar la superfície de les lleves és podria dur a terme un tractament superficial d'adició de carboni (cementació) o bé un recobriments per el desgast, tot vigilant que les temperatures de treball no activessin de nou la difusivitat del carboni o l'element en qüestió.

En el nostre cas l'arbre de lleves d'escapament està ensamblat doncs existeixen arbres individuals lliscants en un eix que fa de bancada o arbre principal. En el d'admissió pot ser un eix solidari d'una peça.

### **9.3 Vàlvula**

La vàlvula de seient consisteix en un forat i un tap cònic, col·locat a l'extrem d'una vareta, també anomenat "cua o tija de la vàlvula". La tija fa que la vàlvula es desplaci formant una translació (a més d'una rotació en alguns casos) a través d'una guia per on llisca fins a obrir o tancar el forat anomenat seient que és on s'aposen.

Depenent de la manera en que estan encarades les vàlvules, la pressió de la cambra ajuda a tancar-les.

Les vàlvules han de resistir les elevades i repetides sol·licitacions causades pels cops sobre els seients.

Les vàlvules d'admissió acostumen a ser majors per a minimitzar els efectes del fregament al intervindrà en una fase en que l'aire o mescla entra al cilindre per succió en motors atmosfèrics. En les vàlvules d'escapament no urgeix tant i per això són d'una mida més petita en comparació amb les d'admissió doncs el pistó empeny i bombeja els



Il·lustració 91 Imatge de diferents models de vàlvula de seient.  
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/fd6-fd6-4g-fd6t-3g-fd6t-4g-engine-cylinder-head-valve-seat-60151400301.html>

gasos la qüestió de la mida té importància en la transmissió de la calor, s'explica posteriorment\*.

Les vàlvules d'escapament són les que més calor s'emporten i per això és important que siguin altament conductores per transmetre a l'exterior l'energia acumulada en forma de calor per fer-ho algunes són sovint construïdes buides i plenes parcialment de sodi metàl·lic o de sals de liti i de potassi, que resulten líquides a la temperatura de funcionament.

Així doncs la vàlvula ha d'estar en condicions de poder transmetre a l'aire o a la culata (aquesta refrigerada per aigua); la dissipació de la calor té lloc a través del contacte entre la cua i la seva guia, i entre el plat i el seu seient. Té, per tant, gran importància el grau de refrigeració de la guia i l'assentament, així com el seu material. Les vàlvules estan molt millor refrigerades com menor és el seu diàmetre (perquè menor és la superfície exposada als gasos en proporció a la superfície de contacte amb el seient) i com més gran és la longitud de la guia i el diàmetre de la tija (sent majors les superfícies a través de les quals és dissipat la calor). \*Per això, als efectes de la resistència contra les sol·licitacions tèrmiques, les vàlvules d'escapament es fan, en general, de diàmetre menor que les d'aspiració i, en els cilindres de grans dimensions, és preferible disposar dos (o també més) en lloc d'una sola de gran diàmetre.

La construcció de la vàlvula d'escapament pot ser amb acer crom silici o d'un acer al crom níquel. La construcció de la vàlvula d'admissió pot ser d'acer silici magnesi.

L'acabat de la vàlvula ha de ser poc rugós per a minimitzar la fricció amb el fluid i evitar la pèrdua de càrrega. En la tija un valor també de grau fi per minimitzar el fregament amb la guia i en el seient una tolerància de forma i concentricitat acurada juntament amb una rugositat baixa que no obtingui fuites per assegurar l'estanqueïtat del seient, aquest fet en acer i incrustat a la culata doncs aquesta no té resistència al desgast tant bona per ser l'alumini més tou que l'acer de la vàlvula.

#### **9.4 Guies de vàlvula**

Aquest és l'element encarregat de guiar la vàlvula en el seu moviment d'obertura i tancament té la funció d'absorbir les forces laterals que actuen sobre la tija de la vàlvula. La guia centra la vàlvula en l'insert per seient de vàlvula i deriva una part de la calor des del cap de la vàlvula a través de la tija cap a la culata.

La guia s'interposa a pressió entre la culata i la vàlvula, doncs la culata no ha de ser objecte de desgast, d'aquesta manera es poden substituir en cas de mal funcionament minimitzant costos.

Per a la fabricació de les guies de vàlvula s'empren materials amb bones propietats de



Il·lustració 92 Imatge de diferents tipus de guies.  
<https://www.ms-motorservice.es/productos-catalogos/productos/guies-de-valvula/#Gu%C3%ADas%20de%20v%C3%A1lvula>

lliscament i de conductibilitat tèrmica. En particular la fosa gris i el llautó amb elements especials d'aliatge.

**Fosa gris amb estructura perlítica.** Aquest material es caracteritza per una bona resistència al desgast i es presta per a la construcció de guies sotmeses a un grau de sol·licitació normal.

**Fosa gris amb estructura perlítica bàsica i una concentració elevada de fòsfor.** L'estructura reticular del fòsfor incrementa notablement la resistència al desgast i millora les propietats de rodatge. S'utilitza en motors amb un grau de sol·licitació mitjana.

**Fosa gris amb estructura perlítica bàsica i una concentració elevada de fòsfor i crom.** S'utilitza especialment en motors sotmesos a alts esforços.

**Aliatge de CuZnAl.** Aquest material posseeix una bona resistència al desgast i excel·lents propietats lliscants. Les guies d'aquest aliatge són idònies per a motors que es sotmeten a esforços normals o mitjans.

### 9.5 Molles

El tancament de la vàlvula en un sistema normal està produït per una molla que pressiona la vàlvula contra el seient per al tancament d'aquesta. Així doncs tenen la funció de tornar les vàlvules d'el motor ràpidament a la seva posició de repòs instants després de la seva obertura. Sense la força expansiva de les molles un cop comprimides, aquesta acció no seria possible.

La utilització de molles en els trens de vàlvules permet tancar les cambres de combustió hermèticament, exercint una tensió constant de les vàlvules sobre el seu seient (tancament), i generant una resistència a l'obertura que ha de ser vençuda.

La tensió de les molles ha de ser prou alta per poder tancar ràpidament les vàlvules, i al mateix temps, relativament baixa per facilitar l'obertura de les mateixes tot tenint en compte els temps de retorn i el retràs que es pugui generar en l'acció. En motors de competició, les molles de vàlvula seran peces crucials perquè el motor mantingui la seva sincronia a màximes revolucions. En sistemes amb Taqué(element que dona altura i tolerància zero entre vàlvula i lleva) on es mou amb acceleracions negatives, la força de la molla ha de ser considerablement més gran que les forces d'inèrcia produïdes, per tal que el Taqué mantingui el contacte amb la lleva. Això vol dir que aquesta força depèn de la massa de les parts mòbils del mecanisme i de l'acceleració generada pel perfil de lleva.

Les molles es fabriquen, normalment, amb fils d'acer al carboni enrotllats en una forma helicoïdal. A causa de la gran capacitat de deformació que han de suportar els ressorts, cal que per a la seva fabricació s'emprin aquells tipus d'acers que puguin oferir una gran elasticitat, com són els acers al carboni, acers al silici, acers al crom-vanadi, acers al crom-silici, etc.



**Il·lustració 93 Molla triple de competició, composta en difenets molles per a evitar el trencament per ressonància amb l'adició d'una molla dissipadora entremig per a minimitzar encara més aquest efectes.**  
<https://www.jegs.com/images/photos/600/660/660-221432-1.jpg>



### **9.6 Tapa de balancins**

Encarregada de cobrir els elements de la culata i mantenir tancat el sistema. Pot estar feta amb planxa d'acer o alumini premsada en fred. O de un polímer plàstic fet per injecció.



Il·lustració 94 Imatge d'una tapa de balancins o tapa superior de culata d'un automòbil Kia Rio.  
<https://www.repuestoscoches24.es/recambios/tapa-de-balancines/kia/rio>

### **9.7 Altres elements de la culata**

Plats que subjecten les molles amb les vàlvules a partir del con partit o clip. Fets amb acer al carboni.

Taques, balancins, disc de desgast.

Rodaments i coixinets.

Cargols i femelles. Qualitat 8.8 o superior.

Juntes, encarregades de generar estanqueïtat entre certs elements.

Retenidors: Encarregats de segellar els eixos, fets de goma NBR amb la duresa corresponent a la temperatura de treball i poden tenir el llavi marcat segons la direcció de treball de l'eix per redirigir els possibles fluids cap a l'interior aprofitant el gir de l'eix.



Il·lustració 97 Cargols de culata.  
<https://www.recambioscoche.es/pieza-de-repuesto/tornillos-de-culata-256.html>



Il·lustració 96 Retenidors.  
<https://rodagroup.cl/tienda/reten-30x50x8-mm/>



Il·lustració 95 Empenyadors/taqués hidràulics.  
<https://listado.mercadolibre.cl/taques-hidraulicos>

### **9.8 Taula de materials**

Materials assignats de la biblioteca del programa de disseny Siemens NX.

<b>Peça</b>	<b>Material</b>	<b>Massa unitària</b>	<b>Massa total de les quantitats</b>	<b>Volum unitari</b>	<b>QUANTITAT (simetries incloses)</b>	<b>PREU matèria prima per tonelada</b>	<b>Preu Material de les peces (quantitats comptades)</b>	<b>Preu del procés de fabricació (quantitat comptades)</b>
Bloc culata	Alumini 5086	8.1220kg	8.1220kg	3053.37cm <sup>3</sup>	1	1756.53€	14.267 €	70€
Arbre de llesves admissió	Acer 4340	459.285g	459.285g	58.51cm <sup>3</sup>	1	1054.44€	0.484€	44.23€
Arbre de llesves escapament atmosfèric	Acer 4340	222.751g	222.751g	28.376cm <sup>3</sup>	1	1054.44€	0.235€	22.12€
Eix arbre de llesves escapament Berdrod	Acer 4340	125.444g	125.444g	15.98 cm <sup>3</sup>	1	1054.44€	0.132€	15€
Lleva lliscant escapament Berdrod	Acer 4340	48.976g	97.952g	6.24cm <sup>3</sup>	2	1054.44€	0.103€	11.06€
Rodet guia	Acer, AISI steel 1005	29.379g	58.758g	3.73 cm <sup>3</sup>	2	878.743€	0.052€	30€
Eix dels rodets guia	Acer, AISI steel 1008 HR	74.088g	74.088g	9.41cm <sup>3</sup>	1	421.46€	0.031€	15€
Capçal eix rodets guia	Acer, AISI steel 1005	4.624g	4.624g	587.37mm <sup>3</sup>	1	878.743€	0.004€	2€
Final eix rodets guia	Acer, AISI steel 1008 HR	8.566g	8.566g	1.09 cm <sup>3</sup>	1	421.46€	0.004€	8€
Acompanyador	Acer, AISI steel 1005	5.49g	10.98g	697.47mm <sup>3</sup>	2	469.38€	0.005€	15€
Brida del acompanyador	Acer, AISI steel 1005	0.866g	3.464g	110.02mm <sup>3</sup>	4	469.38€	0.002€	6€
Eix balancins/tub d'alimentació oleohidràulica	Acer4340	100.246g	200.492g	12.77cm <sup>3</sup>	2	856.147€	0.172€	20€
Balanci admissió atmosfèric	Ferro colat G25	35.311g	141.244g	4.94cm <sup>3</sup>	4	990€	0.14€	20€
Balanci escapament atmosfèric	Ferro colat G25	30.196g	120.784g	4.22cm <sup>3</sup>	4	990€	0.12€	20€
Balanci admissió Berdrod	Ferro colat G25	33.140g	132.56g	4.63cm <sup>3</sup>	4	990€	0.131€	32€



Motor Tèrmic Berdrod  
Marc Bernet Duque

monollewa								
Balanci admissió Berdrod doble lleva	Ferro colat G25	19.562g	39.124g	2.74cm <sup>3</sup>	2	990€	0.039€	16€
Conjunt de pins del sistema de bloqueig de balancins per cilindre	Acer, AISI steel 1005	6.455g	12.91g	819.96mm <sup>3</sup>	2	878.743€	0.012€	6€
Rodet balanci	Acer, AISI steel 1008 HR	2.376g	61.776g	301.85mm <sup>3</sup>	26	—	—	26€
Rodet voladiu	Acer, AISI steel 1008 HR	1.897g	11.382g	240.98mm <sup>3</sup>	6	—	—	6€
Rodet gruixut voladiu	Acer, AISI steel 1008 HR	3.875g	7.75g	492.31mm <sup>3</sup>	2	—	—	3€
Balanci escapament Berdrod	Ferro colat G25	27.257g	109.028g	3.81cm <sup>3</sup>	4	990€	0.108€	20€
Separador balancins admissió	Acer, AISI steel 1005	3.562g	28.496g	452.52mm <sup>3</sup>	8	3819.47€	0.109€	4€
Separador balancins escapament	Acer, AISI steel 1005	4.202g	33.616g	533.81mm <sup>3</sup>	8	3819.47€	0.128€	4€
Suport inferior d'arbre de lles i altres	Alumini 5086	17.528g	175.28g	6.59cm <sup>3</sup>	10	878.897€	0.154€	30€
Suport intermig d'arbre de lles i altres	Alumini 5086	52.284g	365.988g	19.66cm <sup>3</sup>	7	878.897€	0.322€	35€
Suport intermig distribució escapament Berdrod	Alumini 5086	48.511g	145.533g	18.24cm <sup>3</sup>	3	878.897€	0.128€	21€
Suport superior de l'arbre de lles	Alumini 5086	16.561g	149.049g	6.23cm <sup>3</sup>	9	878.897€	0.131€	27€
Suport superior distribució escapament Berdrod	Alumini 5086	16.256g	16.256g	6.11cm <sup>3</sup>	1	878.897€	0.014€	5€
Plat distribució	Acer, AISI steel 1008 HR	78.438g	156.876g	9.96cm <sup>3</sup>	2	421.46€	0.066€	30€
Pinyó eix rodet guia	Acer, AISI steel 1008 HR	7.231g	14.462g	918.55mm <sup>3</sup>	2	421.46€	0.007€	10€
Empenyedors	Acer, AISI steel 1008 HR	13.688g	219.008g	1.74cm <sup>3</sup>	16	421.46€	0.092€	40€

Motor Tèrmic Berdrod  
Marc Bernet Duque

Plat subjecció molla	Acer, AISI steel 1008 HR	8.239g	131.824g	1.05cm <sup>3</sup>	16	421.46€	0.056€	16€
molla	Acer, AISI steel 1008 HR	26.813g	429.008g	3.41cm <sup>3</sup>	16	482.82€	0.207€	24€
Con partit	Acer, AISI steel 1008 HR	1.735g	27.76g	220.446mm <sup>3</sup>	16	421.46€	0.012€	1.6€
Vàlvula admissió	Acer 4340	27.969g	223.752g	3.56cm <sup>3</sup>	8	1054.44€	0.236€	53.33€
Vàlvula escapament	Acer 4340	22.867g	182.936g	2.9cm <sup>3</sup>	8	1054.44€	0.193€	53.33€
Guia de vàlvula	Ferro colat G25	17.725g	283.6g	2.48cm <sup>3</sup>	16	990€	0.281€	16€
Seient de vàlvula admissió	Acer 4340	4.541g	36.328g	578.45mm <sup>3</sup>	8	856.147€	0.031€	13.28€
Seient de vàlvula escapament	Acer 4340	3.812g	30.496g	485.55mm <sup>3</sup>	8	856.147€	0.026€	13.28€
Tapa de balancins	Alumini 5086	817.867g	817.867g	307.47cm <sup>3</sup>	1	1756.53€	1.437€	30€

### **9.8.1 Masses**

Massa total sense el bloc culata ni tapa de balancins: 4.61Kg

**Massa total: 13.55Kg**

### **9.8.2 Materials metàl·lics emprats:**

Material	Preu en € per tonelada	Comanda mínima en tonelades	Massa emprada per a una unitat del producte en grams	Unitats de peces aprofitables per tonelada de material (sense pèrdues)
Alumini 5086, servei de fundació en motlle	1756.53	5	8939.86	559
Alumini 5086 extrudit	878.897	5	852.106	5867
Acer 4340 en barra rodona	1054.44	1	1312.12	762
Acer 4340 en tub	856.147	0.1 (100Kg)	267.316	374
Acer AISI 1005 barra rodona	878.743	1	76.292	13107
Acer AISI 1005 plantxa	469.38	2	14.444	138465
Tub Acer AISI 1005	3819.47	1	62.112	16099
Ferro colat G25, servei de fundació en motlle.	990	3	826.34	3630

Acer 1008 HR barra rodona	421.46	1	632.58	1580
Acer 1008HR fil ferro	482.82	1	429.008	2330

## **10. PRESSUPOSTOS**

### **10.1 Pressupost de l'estudi i disseny del prototip:**

Data d'inici: 1/02/2019

Data de finalització: 28/06/2019

Dies totals:148; dies laborables:108

Jornada laboral de 6h diàries. Hores totals del projecte: 648h

Honoraris: 20€/hora

**Cost total de l'estudi teòric i del disseny del prototip: 12.960,00€**

### **10.2 Pressupost del producte físic:** (excent de tornilleria, juntes, sensors i bujies)

Preu de les matèries primes, una unitat del model fabricat: 19.67€

Preu del conjunt de costos de fabricació per a un model fabricat: 834€

**Preu total brut: 853.67€**

Amb un increment del benefici desitjat sobre cada unitat del 50%:

**Preu final producte: 1708€**

### **10.3 Producció en sèrie**

#### **10.3.1 Suma total dels pressupostos per a un llançament inicial de 1200 unitats del model**

**Inversió inicial:** 12.960,00 € de l'estudi + 23.828,44€ en matèries primes(comanda mínima) + 1.000.800,00€ de processos de fabricació (1200u) = **1.037.588,44 €**

#### **10.3.2 Balanç**

Balanç de pèrdues i guanys sense defectes, només incloent allò que s'implica en la fabricació directa del producte.

Perdues: 1.037.588,44€

Guanys bruts: 1200 unitats x 1708€ =2.049.600,00€

**Benefici net destinat a l'empresa: 1.012.011,56€**

## **11. IMPACTE MEDIAMBIENTAL**

Com a qualsevol projecte és primordial valorar la sostenibilitat del producte o servei ofert, doncs és deure de tots i totes preservar el mediambient i no abusar de l'imbasibilitat com a espècie en el planeta terra. Malauradament l'elevat índex de població mundial, juntament amb un estil de vida expansiu de part de la població, o la falta de coneixement deixa empremta en el món.

Tot i que aquest projecte sorgeix d'una necessitat de millora de comoditat i de prestacions d'un motor de combustió destinat a un vehicle utilitari de dos rodes implica directament en el seu funcionament metamorfosic una reducció del cubicatge i millora de l'omplenat dels cilindres, amb un rendiment més alt per litre i un consum reduït en zones urbanes on la concentració d'agents nocius o contaminants dels gasos produïts per la combustió és concentrada i és d'important atenció per la salut de les persones.

L'altre punt a la llista de valoracions per a la sostenibilitat és l'elecció del combustible, que apart de tenir una gran presència en l'actualitat l'ús del GLP aporta una naturalesa del fluid ideal per a la forta compressibilitat de la fase en que el motor és auto-sobrealimentat i una lleugeresa i reducció de gasos contaminants important.

És evident que aquest projecte no pot competir envers un motor elèctric però es demostra la insaciable naturalesa de l'esser humà de millora constant i la persistència contra el canvi.

## **12. CONCLUSIÓ**

El present treball com s'ha dit des de l'inici, no és més que una idea pròpia portada a la teoria o practica viable. Això no vol dir que sigui una idea egoista, l'estudi està pensat per a poder produir i fer arribar el prototip Berdrod a tothom qui senti amb la mateixa passió que jo els canvis que comporta sobre el vehicle.

A part com a futur enginyer em concerneix esmentar que el disseny del producte ha estat pensat des de molts punts de vista de consumidor, des del muntador al conductor passant per l'operari de fabricació.

La conclusió que en puc treure a part d'haver enriquit els meus coneixements, millorar la visió constructiva, i sentir-me realitzat; és que el sector en que encaixaria més és en el de la indústria de motocicletes utilitàries/esportives per la corba de comportament del motor. L'altra conclusió, aquesta negativa, és la forta competició amb el mercat del motor elèctric destinat a vehicles actualment en augment.

Finalment gràcies estimat lector, per l'interès en la creació d'aquesta obra doncs és aquí on l'art i la ciència uneixen els seus camins fets per la inspiració i la passió.

### **13. AGRAÏMENTS**

Agraeixo a aquelles persones que no m'han posat el camí fàcil al llarg de la meva vida i que no han tingut escrúpols per a valorar una feina no prou ben feta doncs això és el millor incentiu per a la millora constant.

Agraeixo en general les oportunitats de tenir contacte amb el món de la mecànica que he pogut gaudir gracies a tercers, principalment la família. I sobretot dono gràcies als meus pares per criar-me com ho han fet i brindar-me l'opció d'estudiar el que m'agrada.

Gràcies a tots aquells qui m'han donat suport al llarg d'aquest projecte.

### **14. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA**

#### **14.1 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

*Suzuki Gsr 600 (2006) Service/ workshop manual.*

*Maquinas Térmicas Motoras I . Jesús Andrés Álvarez Flórez, ed., Ismael Callejón Agramunt, ed., Sergi Forns Farrús, Pere Roca Carles, David Balsells Grande, Juan Casanova Rossell, Tomás Navarro Odriozola, Carles Forcadell Freixa Angelita González Fontal, Antoni Márquez Luque, Francisco J. Pérez Llopis.*

*Motores Alternativos de Combustion Interna. Jesús Andrés Álvarez Flórez, ed. Ismael Callejón Agramunt, ed., Sergi Forns Farrús, David Balsells Grande, Juan Casanova Rosell, Oscar Bonet Arbolí, Xavier Carrera Murillo, Ramon Carreras i Planells, David Sánchez Gispert, Salvador Miret Carceller, Francisco Liesa Mestres, Luís Isidro Molina, Irene Espada Hormigo, Roger Costa Company, Carles Forcadell Freixas, Alvaro Serrano Fenollosa, Xavier Soldevila Riera, Joaquín Villa Ferrer.*

*Modelo de cálculo y aplicación informática para la fase cerrada de un MACI de ciclo Otto. De Marcos Ferrer díaz i Juan B. Viscarro Torralba.*

*Análisis numérico del sistema de admisión de un motor de combustión interna alternativo de encendido por chispa. De Francisco Carmona Canalejo. Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla*

*Internal Combustion Engine fundamentals by John.B. Heywood (Mc Graw Hill)*

*Simulación de procesos termodinámicos cuasi ideales orientados a la generación de trabajo mecánico. De Xavier Llop Garcia.*

*Modelització de la fase tancada en motors alternatius de combustió interna de cicle Otto mitjançant Matlab. De Miquel Ardanuy Agulló.*

*Modelización y optimización de los parámetros termodinámicos*

Motor Tèrmic Berdrod  
Marc Bernet Duque

*de motores alternativos de combustión interna ciclo Otto y Diesel.*  
*De Alejandro Solanes.*

*Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 12 nº3 (2013)*

*Determinación experimental de la variación del coeficiente politrópico de compresión utilizando diagramas abiertos. De Diego Christian Caputo, Rodolfo Oscar Berberi, Néstor Alberto Emilio Ferré, Fernando Gabriel Russo, Gabriel Aram Receloglu, Pablo Gabriel Cavataiovi & Mauro José Bruno.*

*Estudio del funcionamiento de motores alternativos de combustión interna mediante la utilización de combustibles alternativos. De David Perancho Janer*

*Investigation of knock limitsof dual fuel engines. De Juan Carlos Cando Comino*

*Apunts de les següents assignatures impartides a la Univesitat Politècnica de Catalunya a Vilanova i la Geltrú: MATH (Màquines Tèrmiques i Hidràuliques), ETER (Enginyeria Tèrmica), MAES (Materials Estructurals)*

## **14.2 WEBGRAFIA CONSULTADA**

### **Història i tipus de motors:**

Motor d'encesa per guspira o de cicle Otto - LES MÀQUINES TÈRMiques. (2019). Recuperat de <https://sites.google.com/site/tecnomariaa/maquines-de-combustio-interna-alternatives/motors-alternatius-de-quatre-temps/motor-d-encesa-per-guspira-o-de-cicle-otto>

Motor de combustión interna. (2019). Recuperat de [https://es.wikipedia.org/wiki/Motor\\_de\\_combusti%C3%B3n\\_interna#Motor\\_de\\_carga\\_e\\_stratificada](https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna#Motor_de_carga_e_stratificada)

Salazar, p. (2019). La historia del motor de combustión interna - PatiodeAutos.com. Recuperat de <https://patiodeautos.com/revista/generales/historia-motor-combustion-interna>

Villarreal, D., Clavero, D., Clavero, D., G.Artés, D., G.Artés, D., & Giménez, P. et al. (2019). El primer motor de combustión interna funcionaba con hidrógeno. Recuperat de <https://www.diariomotor.com/2010/07/26/el-primer-motor-de-combustion-interna-funcionaba-con-hidrogeno/>

4. Màquines de combustió interna rotatives - Tecno3 Martin. (2019). Recuperat de <https://sites.google.com/site/tecno3martinbravo/u-3-motors-termics/4-maquines-de-combustio-interna-rotatives>

### **Sistemes de sobrealimentació:**

Sobrealimentación de motores: Concepto y tipos. (2019). Recuperat de <https://www.motorpasion.com/tecnologia/sobrealimentacion-de-motores-concepto-y-tipos>

Motor Tèrmic Berdrod  
Marc Bernet Duque

Sobrealimentació. (2019). Recuperat de  
<https://ca.wikipedia.org/wiki/Sobrealimentaci%C3%B3>

Barone, S., Citarella, B., Crispiani, F., Pesavento, N.. (2011). Sobrealimentación en motores. De UNLP.

Sobrealimentación de motores: Compresores mecánicos volumétricos y centrífugos. (2017). Recuperat de <https://www.motorpasion.com/tecnologia/sobrealimentacion-de-motores-compresores-mecanicos-volumetricos-y-centrifugos>

Compresor Lysholm (Automoción). (2017). Recuperat de <https://glosarios.servidor-alicante.com/automocion/compresor-lysholm>

Wave Rotor Projects. Recuperat de  
[https://www.egr.msu.edu/mueller/projects\\_waverotor.htm](https://www.egr.msu.edu/mueller/projects_waverotor.htm)

Not2Fast: Turbo Efficiency Maps. (2007). Recuperat de  
<http://www.not2fast.com/turbo/maps/>

#### **Fitxes tècniques motocicletes comparació motor mono i tetracilíndric:**

Honda CBR600RR 2013-2016 -Motorfichas.com-. Recuperat de  
<https://www.motofichas.com/marcas/honda/cbr600-rr-13>

Precio y ficha técnica de la moto KTM 640 LC4 Supermoto 2007 - Arpem.com -. (2019). Recuperat de <https://www.arpem.com/motos/modelos/ktm/modelos-07/ktm-640-lc4-supermoto.html>

#### **Funcionament motor 4t Otto:**

Motor de quatre temps. (2019). Recuperat de  
[https://ca.wikipedia.org/wiki/Motor\\_de\\_quatre\\_temps](https://ca.wikipedia.org/wiki/Motor_de_quatre_temps)

#### **Cilindres superquadrats/quadrats/allargats:**

Stroke ratio. (2019). Recuperat de [https://en.wikipedia.org/wiki/Stroke\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Stroke_ratio)

#### **Distribució comandada electrònicament:**

Freevalve Technology | Freevalve. (2019). Recuperat de  
<http://www.freevalve.com/technology/freevalve-technology/>

#### **Distribució vtec:**

Ricardo, V. MOTOR Sistema vtec. (2015). Recuperat de  
<https://www.youtube.com/watch?v=lvHFNHPaMis&feature=youtu.be>

VTEC (2019). Recuperat de <https://ca.wikipedia.org/wiki/VTEC>

Puig, I. (2019). Cómo es el sistema VTEC de Honda | espíritu RACER. Recuperat de  
<https://espirituracer.com/reportajes/como-es-el-sistema-honda-vtec/>

Distribucion variable: VTEC de Honda. (2014). Recuperat de  
[http://www.aficionadosalamecanica.net/distribucion\\_variable-vtec.htm](http://www.aficionadosalamecanica.net/distribucion_variable-vtec.htm)

**Fitxa tècnica motor base estudi Suzuki gsr 600:**

Ficha técnica de la Suzuki GSR 600 2007. Recuperat de <https://www.motofan.com/suzuki/gsr-600/ficha-tecnica>

**Manual de taller Suzuki gsr 600:**

Download Suzuki GSR600 Service Manual. Recuperat de <https://www.manualslib.com/download/860672/Suzuki-Gsr600.html>

**Termodinàmica:**

Termodinámica de los compresores.. Recuperat de [http://eribera\\_bo.tripod.com/termodinamica\\_1.html](http://eribera_bo.tripod.com/termodinamica_1.html)

Mohd, M. (2015). Recuperat de [https://www.researchgate.net/figure/Development-in-the-cumulative-J-availability-terms-of-diesel-engine-and-its-subsystems\\_fig4\\_319809338](https://www.researchgate.net/figure/Development-in-the-cumulative-J-availability-terms-of-diesel-engine-and-its-subsystems_fig4_319809338)

Largo, J. (2009). Termoquímica de las mezclas aire - combustible | Combustion | Enthalpy. Recuperat de <https://www.scribd.com/doc/15932135/Termoquimica-de-las-mezclas-aire-combustible>

**Massa molar càlcul directe:**

Calculadora de masa molar, peso molecular y composición elemental. (2019). Recuperat de <https://es.webqc.org/mmcalt.php>

**Equació woshcni:**

Soyas (2009). Tema05 Pérdidas De Calor. Refrigeración. Recuperat de <https://es.slideshare.net/shoyas/tema05-perdidas-de-calor-refrigeracin>

Carrera-Escobedo, J.L., Guzman-Valdivia, C.H., Ortiz-Rivera, A., Désiga-Orenday, O. y García-Ruiz, M.A. (2013). MODELO TERMODINÁMICO DE UNA ZONA CON RELACIONES PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES ALIMENTADOS CON BIOGÁS. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 12, 649-660. Recuperat de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a25.pdf>

**Constant politripica n:**

Eriksson, L. i Andersson, I. (2002). An Analytic Model for Cylinder Pressure in a Four Stroke SI Engine. Recuperat de [http://macmadigan.com/Public/cylinder\\_pressure/EriAnd\\_2002\\_SAE.pdf](http://macmadigan.com/Public/cylinder_pressure/EriAnd_2002_SAE.pdf)

**Combustibles:**

Etanol. (2019). Recuperat de <https://ca.wikipedia.org/wiki/Etanol>

Metanol. (2019). Recuperat de <https://ca.wikipedia.org/wiki/Metanol>

Gas natural. (2019). Recuperat de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Gas\\_natural](https://ca.wikipedia.org/wiki/Gas_natural)



Motor Tèrmic Berdrot  
Marc Bernet Duque

Butà. (2019). Recuperat de <https://ca.wikipedia.org/wiki/But%C3%A0>

Propà. (2019). Recuperat de <https://ca.wikipedia.org/wiki/Prop%C3%A0>

Penabad, L. (2018). Diferencias entre GLP y GNC: ¿qué combustible es mejor?. Recuperat de <https://noticias.coches.com/consejos/diferencias-entre-glp-y-gnc-que-combustible-es-mejor/86314>

**Culata Material:** Apunts MAES aliatges de l'alumini.

**Vàlvula de seient:**

Válvula de asiento. (2019). Recuperat de [https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula\\_de\\_asiento](https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_de_asiento)

**Guies catàleg i definicions:**

Guías de válvula · Motorservice, Recuperat de <https://www.ms-motorservice.es/productos-catalogos/productos/guias-de-valvula/#Gu%C3%ADas%20de%20v%C3%A1lvula>

**Molles de vàlvules:**

DIFILIPPO, P. i LOMMO, N. (2016). Resortes de válvulas. Recuperat de <http://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2504/Resortes%20de%20v%C3%A1lvulas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>